IU FANGFA YU FANGFALUN CONGSH

FUZAXING
KEXUE DE
FANGFALUN
YANJIU

万卷方法/研究方法与方法论丛书
WANJUAN FANGFA
YANJIU FANGFA YU FANGFALUN CONGSHU

复杂性科学的方法论研究

■黄欣荣 著



重庆大学出版社
http://www.cqup.com.cn

YANJIU FANGFA YU FANGFALUN CONGSH

FUZAXING KEXUE DE FANGFALUN YANJIU

兴起于20世纪80年代的复杂性研究或复杂性科学，是系统科学发展的新阶段，也是当代科学发展的前沿之一。尽管目前它仍处于萌芽和形成阶段，但已引起了学术界的广泛重视，并被誉为“21世纪的科学”。复杂性科学之所以获得如此的盛誉，主要是因为它在科学方法论上的突破。复杂性科学的兴起在哲学上对传统的科学方法论（如还原论、整体论等）产生了重大冲击，其研究也采用了许多传统科学研究未采用甚至排斥的研究方法。复杂性科学方法论既是对传统科学方法论的重大挑战，也是对传统科学方法论的重要补充，并对复杂性科学自身的健康发展有着重要的意义。


ISBN 7-5624-3825-0
9 787562 438250

ISBN 7-5624-3825-0
定价：25.00元

Y A N J I U F A N G F A Y U F A N G F A L U N C O N G S H U

FUZAXING
KEXUE DE
FANGFALUN
YANJIU

万卷方法 / 研究方法与方法论丛书

WANJUAN FANGFA

YANJIU FANGFA YU FANGFALUN

复杂性科学的方法论研究

■黄欣荣 著

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

复杂性科学的方法论研究/黄欣荣著. —重庆:重庆大学出版社,2006.9
(万卷方法. 研究方法与方法论丛书)
ISBN 7-5624-3825-0

Ⅰ.复... Ⅱ.黄... Ⅲ.复杂性理论—方法论—研究 Ⅳ.N941.4-03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 105650 号

复杂性科学的方法论研究

黄欣荣 著

责任编辑:雷少波 崔荣庚 陈 进 版式设计:雷少波
责任校对:李小君 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行
出版人:张鸽盛
社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内
邮编:400030
电话:(023) 65102378 65105781
传真:(023) 65103686 65105565
网址:http://www.cqup.com.cn
邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)
全国新华书店经销
重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:231 千 插页:16 开 2 页
2006年 10 月第 1 版 2006年 10 月第 1 次印刷
印数:1—2 000
ISBN 7-5624-3825-0 定价:25.00元

序

从哲学的角度特别是从科学哲学的角度探索复杂性科学的方法论,按照自然主义的观点,这既是复杂性科学的重要工作和重要组成部分,也是科学哲学从特殊学科对科学进行研究和反思的一个方面和组成部分。对于科学哲学研究特别有意义的是,复杂性科学研究还是正在进行的科学研究,是“还未成熟”的学科。因此对这种还未成熟的学科进行科学哲学研究就带有双重任务:第一,探索学科发展中研究活动是如何展开的,运用了哪些有效或者无效的方法对复杂性问题和领域进行了研究,这些方法的性质、意义如何? 这就是方法和方法论反思;第二,就是研究复杂性科学研究作为未成熟学科能够对科学哲学增添一种新的学科类别研究,这种类别还不仅仅在于它是一个新的学科,而且还特别在于它是未成熟学科。

黄欣荣在清华大学做博士论文期间,选取了第一种角度,对复杂性科学与科学方法论的关联进行了研究。这种工作是在一个学科还在发展中时就对其方法探索进行方法论研究,因此很具有基础性作用。这种工作的难度也正是因为如此变得很大,因为这种探索就像探索冰山一样,所暴露在冰河上面的只是冰山的一角而已,需要探索者穿上“潜水服”,拿上探测器深潜下去。

黄欣荣不畏困难,还是选择这样一个有难度的问题研究了下去。在做这个问题的时候,他发现,复杂性科学与科学方法论的联系主要表现在三个方面:第一,需要对复杂性语境进行方法论反思。复杂性科学研究因为涉及的问题、领域大都是传统学科所运用的方法无法解决的问题和领域,也就是说,传统的以还原为主要特征的科学方法在复杂性领域显得无能为力。因此复杂性科学首先就要从研究方法上探索如何突破和革新,也特别需要超越已经成为思维定势、占绝对统治地位的还原论,需要寻找新的方法论,以便解决复杂性的问题。第二,需要原汁原味地找到复杂性科学研究中所使用的方法工具。这第二个任务似乎比第一个任务容易,但是实际上它同样具有很大的难度,因为对于一个从事科学哲学这种对于科学而言是二阶研

究的学者来说，他尽管有理工科的背景，但是完全读懂复杂性在各个学科上的研究，并且能够总结和抽象出相应的方法工具，也绝非易事，这既涉及数学、物理和生命科学，也涉及对这些学科中采用的复杂性概念、方法的哲学体悟。黄欣荣还是比较好地完成了这些任务，他发现复杂性科学在突破传统科学方法论的基础上，采用了一些传统科学不甚认可或不常使用的科学方法，例如隐喻；有些则在传统科学方法的基础上进行了革新改造，例如模型、数值、计算、虚拟等。这些方法在复杂性科学中获得了新的涵义，在复杂性科学中发挥了重要的作用，并反过来又丰富了这些科学方法。第三，复杂性科学中的方法论意蕴：复杂性科学的内容也像系统科学一样，具有方法论的意蕴，本身也可以上升为科学方法，作为研究的工具用于其他学科的研究。用复杂性的眼光和方法去透视任何一个传统的学科领域，都可能发现传统方法难于采掘的新“矿藏”，使得老学科获得新生命。这是复杂性的方法和方法论应用方面的研究了。当然，限于时间和篇幅，在做博士论文的研究时，黄欣荣最后还是舍弃了这个方面的研究。也就为自己今后的研究留下了一个可继续扩展的空间。事实上，这第三个方面是足可以成为一个独立的研究的，而且它也是一个需要深度采掘的“富矿”，有足够的准备和精力，才能去开采它。暂时舍弃它也是对的，否则可能在前两个问题上研究不到位。

复杂性科学从目前来说更像是一场思维方式的变革运动。在21世纪开始时，对这种发展中的复杂性科学与科学方法论进行研究，应该是一种很有意义的工作。从科学方法论的角度来研究复杂性，对于我们认识复杂性问题和学科性质，都会有很好的意义。

在黄欣荣这个关于复杂性方法论研究的成果就要出版的时候，他嘱我做序，作为他的博士生导师和朋友，这个序就算做我对他的一个希望和祝福。我想，黄欣荣有足够的眼界，能够看出问题的重要与否，而且能够抓住问题，一旦抓住问题，很快就可以产生一些成果。但是出成果快，既是优点，也可能带来一些问题，我希望他不仅能够不断地运用复杂性方法和思维去开拓新的领域，进行新的研究，取得更多的优秀成果，而且能够把抓住的重要问题挖掘得更深、更透。

老子说：道生一，一生二，二生三，三生万物。有了道，就不愁一，有了一，还愁二吗？而达到三的境界，万物也就不远了。所以最重要的，是：道。

吴　彤

2006年5月于清华园

作者简介

黄欣荣，男，1962年5月生，江西赣州人，在中南大学分别获工学学士和哲学硕士学位，2005年7月毕业于清华大学科技哲学专业，获哲学博士学位。现为江西财经大学图书馆馆长、人文学院教授、应用经济学博士后流动站博士后。主要从事科技哲学和科技管理（复杂性哲学、技术哲学与技术创新）、复杂性经济学和复杂性管理研究，在《自然辩证法研究》等中文核心期刊发表论文近60篇。

目 录

第一章
复杂性科学与科学方法论导论

兴起于20世纪80年代的复杂性研究(complexity researches)或复杂性科学(complexity sciences),是系统科学发展的新阶段,也是当代科学发展的前沿之一。尽管目前它仍处于萌芽和发展形成阶段,但已引起了科学界的广泛重视,已被有些科学家誉为“21世纪的科学”。复杂性科学为什么会获得如此的盛誉呢?这主要是因为它在科学方法论上的突破。复杂性科学的兴起在哲学上对传统的科学方法论,如还原论、整体论等产生了重大冲击,其研究也采用了许多传统科学研究较少采用甚至被排斥的研究方法。复杂性科学方法论对传统科学方法论既是重大的挑战,也是重要的补充,对复杂性科学自身的健康发展也有着重要的意义。

第一节 复杂性科学:21世纪的新科学

按照传统的理解,简单与复杂是相对的,一个事物在未被认识之前是复杂的,一旦被认识就变得简单。从人类认识事物的过程看,这种情形是常见的。现代科学技术的发展也表明,不能把复杂性全部归结为认识过程的不充分性,必须承认存在客观的复杂性,真正的复杂性应当具备自身特有的规定性,即使已被人们认识,即使找到解决办法,它仍然是复杂的。就是说,应当找出简单性与复杂性之间某种根本性质的区别,使复杂性科学具有相对

确定的研究领域。

关于复杂性的研究，在很早的时候就已开始，只不过用的名字不是"复杂性"而已。人工智能与认知心理学研究的先驱、诺贝尔经济学奖获得者司马贺(Herbert A. Simon，又译赫伯特·西蒙)于1969年首次出版了《人工科学》一书。该书的最后一章题目为《复杂性的构造》，作者认为，在科学和工程中，对系统的研究的活动越来越受到欢迎。它受欢迎的原因，与其说是适应了处理复杂性的知识体系与技术体系的任何大发展的需要，还不如说是它适应了对复杂性进行综合和分析的迫切需要。该书于1996年印行第三版时，作者把原来书中最后的第七章改为第八章，新增了题为《复杂性面面观》一章作为第七章。由此可以看出作者对复杂性科学的关注。司马贺还从科学技术发展的角度对近年来与复杂性密切有关的内容作了扼要的概括：第一次世界大战后，开始了早期的研究，所用的题目是整体论(holism)，经验的整体(gestalts，格式塔)，创造性进化(creative evolution)；在第二次世界大战后所出现的题目是信息(information)，控制论(cybernetics)，一般系统(general systems)；当前的热门题目是混沌(chaos)，自适应系统(self-adaptive systems)，遗传算法(genetic algorithms)以及元胞自动机(cellular automata)。他把与复杂性科学密切相关的若干课题归纳为如下八个方面：①整体论和还原论；②控制论与一般系统论；③复杂性方面当前的兴趣；④复杂性与混沌；⑤在突变和混沌世界中的合理性；⑥复杂性与进化；⑦遗传算法；⑧元胞自动机和生命游戏。

系统科学的先驱者贝塔朗菲于40年代末已经提出研究复杂性的问题。信息论创始人之一的韦弗尔(Warren Weaver)在同一时期提出有组织复杂性和无组织复杂性划分的观点，把有组织复杂性作为系统科学的研究对象，对其后的科学发展产生了深刻影响(Warren Weaver，1948：536-544)。但总的来说，这个时期的复杂性科学尚无实质性进展。在20世纪五六十年代，系统科学获得重要进展的分支是运筹学、控制论、信息论等技术科学，研究对象基本属于简单系统，尚未触及真正的复杂性。70年代以后，关于简单系统的理论日趋成熟，系统科学才真正转向以复杂性为主要对象，试图建立关于复杂系统的一般理论，如美国的圣菲研究所的复杂适应系统理论，欧洲大陆的自组织理论，中国的开放复杂巨系统理论等。

第二节　复杂性科学与科学方法论

对探索事物复杂性的研究，究竟是称为"复杂性科学"还是"复杂性研究"，学术界存在一些争论。例如中国社会科学院的闽家胤（2003：10）赞成使用"复杂性研究"，却不赞成使用"复杂性科学"。他认为道理很简单，"复杂性研究"是可能的，"复杂性科学"是不可能的。科学仅限于研究实体、运动和关系，从未能够为研究一种"属性"建立起一门科学来。譬如"美"是一种属性，人类研究"美"至少几千年了，但美学始终属于哲学范畴，而不是科学。我们不应当直接研究"复杂性"，而应当直接研究"复杂系统"，特别是某一类复杂系统。苗东升（2001：7）也认为，复杂性并不是一门新科学，"因为复杂性研究的成果不是在相对论、分子生物学之外又出现的另一门新学科，而是所有学科领域都有自己的复杂性，都需要超越还原论，不可能把这些成果归属于某一门学科。复杂性研究改变的不是个别学科领域，而是几乎所有学科领域，所有学科领域复杂性研究的总和才是所谓'复杂性科学'。这样说还不够，复杂性探索将开辟大量跨学科研究的新领域，它们无法划归某个现有的学科领域，也不会形成单一的学科。"然而，纵观自然科学文献，大量的科学家却通常都使用"复杂性科学"来指称相关的复杂性研究，并且把混沌、分形以及元胞自动机等理论研究直接称为复杂性科学。因此，在本文中我们采用"复杂性科学"的说法，但并不排斥复杂性研究的称呼。

由于来自数学、自然科学和工程技术等领域以及社会科学领域大致有五六十种各自不同的复杂性的概念，而且目前还没有从这些概念中形成公认的统一复杂性定义，因此，对复杂性科学的认识也就难于取得统一。正如《复杂》一书的作者沃尔德罗普（Waldrop，M.）在其书中开篇指出的："这门学科还如此之新，其范围又如此之广，以至于还无人完全知晓如何确切地定义它，甚至还不知道它的边界何在。然而，这正是它的全部意义之所在。如果说，复杂性科学的研究领域目前尚显得模糊不清，那便是因为这项研究正在试图解答的是一切常规学科范畴无法解答的问题。"（1997：1）目前学界比较倾向于通过方法论来界定"复杂性"和"复杂性科学"。例如，钱学森认为："凡是不能用还原论处理或不宜用还原论方法处理的问题，而要用或宜用新

的科学方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题。”(转引自:许国志,2000:299)苗东升(2001:7)通过研究方法论定义了简单性问题,他说:“所谓简单性问题,指一切可以用还原论方法解决的问题,已经得到系统、全面、透彻的研究。形成完全成熟的普适方法论和具体方法的体系。新的问题还会出现,但只要循着这条路走就可以解决,至多作一些局部的调整、修正,无须作方法论的变革。”由此我们可以看出,复杂性问题或非简单性问题就是指不能完全用还原论方法论解决的问题,作为复杂性科学的研究对象的复杂性和复杂系统就是这类问题。

通过研究方法论来界定学科的领域和性质是复杂性科学的重要特色。一般来说,传统学科是以研究对象来划分的,如数学、物理学、化学、生物学、哲学、历史学、社会学、系统科学等都以研究对象来表明各自的研究范围和相互之间的区别。虽然每门学科都有自己独特的研究方法,但它们之间的区别主要在于研究对象,而不在于研究方法。可是,复杂性研究或复杂性科学不是一门具体的科学,而是分散在许多学科中,是学科互涉的①。之所以被称为复杂性科学,是由于它们所持的方法论立场都已经超越了还原论,所使用的研究方法也都已经超出了还原分析方法的界线。正如苗东升(2001:7)所说:“把按照方法论划分的观点贯彻到底,可否将‘简单性科学’改为还原论科学,把‘复杂性科学’改称为涌现性科学?与 reductionism 对应,可否造个英文词 emergencism?前者主要探求事物的还原释放性,后者主要探求事物的整体涌现性,代表科学探索的两个不同方向,而非高低、难易之分。”

虽然我们对复杂性和复杂性科学都没有一个统一的界定,但复杂性科学具有以下一些特点:

(1)它只能通过研究方法论来界定,其度量标尺和框架就是非还原的研究方法论。通过研究方法论来界定或定义复杂性科学及其研究对象,是复杂性科学的重要特征。

(2)它不是一门具体的学科,而是分散在许多学科中,是学科互涉的,从传统的分类学科到现在的交叉学科,从政治、经济、生物到语言、大脑、市场、交通,几乎人类生活的每一个角落,甚至很难说清它的边界之所在。之所以被称为复杂性科学,是由于它比较一致地超越还原论的方法论立场。

(3)它要力图打破传统学科之间互不往来的界限,寻找各学科之间的相互联系、相互合作的统一机制。

---

① “学科互涉”这个概念来自姜智芹,她在翻译《跨越边界——知识、学科、学科互涉》一书时对原来“跨学科”等称为“学科互涉”。

(4)它要力图打破从牛顿力学以来一直统治和主宰世界的线性理论,抛弃还原论适用于所有科学的梦想。

(5)它要创立新的理论框架体系或范式,应用新的思维模式来理解自然界带给我们的问题。

复杂性科学与科学方法论的关联主要表现在三个方面:

(1)复杂性语境中的方法论反思:复杂性科学因为涉及的领域都是传统学科无法解决的问题,也就是说,传统的科学方法论在复杂性领域显得无能为力。因此复杂性科学首先就要从科学方法论上进行突破和革新,特别是要超越已经成为思维定势的占绝对统治地位的还原论,需要寻找新的方法论,以便解决复杂性的问题。

(2)复杂性研究中的方法工具:复杂性科学在突破传统科学方法论的基础上,采用了一些传统科学不甚认可或不常使用的科学方法,例如隐喻;有些则在传统科学方法的基础上进行了革新改造,例如模型、数值、计算、虚拟等。这些方法在复杂性科学中获得了新的涵义,在复杂性科学中发挥了重要的作用,并反过来又丰富了这些科学方法。

(3)复杂性科学中的方法论意蕴:复杂性科学的内容也像系统科学一样,具有方法论的意蕴,本身也可以上升为科学方法,作为研究的工具用于其他学科的研究。用复杂性的眼光和方法去透视任何一个传统的学科领域,都可能发现传统方法难于采掘的新"矿藏",以使老学科获得新生命①。

复杂性科学从目前来说更像是一场思维方式的变革运动。在这场运动中,一切传统学科都要进行复杂性再审视,把用传统的分析还原思维遗漏丢弃的东西重新筛选一番,从中找出分析还原方法忽视的东西。可以说,在这场复杂性运动中,以新方法论为特色的复杂性的光芒照亮了分析还原方法的死角,各门传统学科又焕发了青春。复杂性科学与科学方法论具有密切的联系。从科学方法论的角度来研究复杂性,从哲学的角度探索复杂性科学的方法论,是复杂性科学的重要工作和重要组成部分。

---

① 复杂性研究虽然在这三个层面与科学方法论相关联,但本书只探讨复杂性研究的方法和方法论两个层面的内容,对复杂性科学的方法论意蕴没有涉及,因此,本书以后不再提及这方面的内容。

第三节 复杂性科学方法论的研究现状

从目前来看,复杂性科学的哲学方法论虽然极为重要,但这方面的工作还不系统,全面深入的研究还有待展开。复杂性科学的发展已经进行了二十余年,并且取得了许多令人鼓舞的成果。为了进一步推动复杂性科学的顺利进行,并及时地将复杂性的成果用于其他学科的研究,我们有必要对复杂性方法论进行系统、全面的哲学探索。

在哲学层次上对传统科学方法论的反思方面,目前有一些值得借鉴的工作成果。例如,哈尔滨师范大学的孙慕天和俄罗斯的采赫米斯特罗合作,对新整体论展开了系统的研究(1996)。他们认为,虽然近现代科学是在还原论的方法论背景下取得的成绩,但在现代思想中,从分析性走向整体性的思维方式转换,已经表现得越来越清楚了。他们从现代科学的整体性观点的发生、量子力学的整体论解释、整体论思想的抽象本质、整体论思想的启发价值到整体论与哲学等五个方面对现代整体论做了比较全面的探讨。不过他们的这些探讨都是从现代物理学,特别是量子力学出发而做的研究,没有结合新兴的复杂性科学。中国社会科学院的金吾伦(2000)根据复杂性理论的方法论意蕴挖掘出生成论哲学。在其专著《生成哲学》中,他全面批判了还原论与构成论,继而对整体论及其复兴做了比较详细的研究;在此基础上,他提出了颇具特色的生成论。他的生成论是基于现代复杂性理论,特别是复杂性理论中的涌现论。他的这些工作是一个很有意义的复杂性哲学方法论的奠基性工作。成思危(1999:1-6)在《复杂科学与管理》一文中提到:"研究复杂系统的基本方法应当是在唯物辩证法指导下的系统科学方法",并提出其应包括四个方面的结合,即定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辨相结合;但他没有对这些方法论的原则展开更加全面的论述。此外,还有一些学者对系统科学及其分支学科的研究方法论做过一些探讨,例如苗东升对系统方法论和混沌研究方法的探索就很有见地。他在许国志(2000:31-36)主编的《系统科学》一书中,从系统方法的哲学基础入手,比较全面地论述了还原论与整体论相结合、定性描述与定量描述相结合、确定性描述与不确定性描

述相结合、系统分析与系统综合相结合等系统方法论原则。

在复杂性科学活动中的方法论方面，国内已经做过一些工作。在我国，最早明确提出探索复杂性科学方法论的是著名科学家钱学森及其系统学讨论班成员，他们在20世纪80年代复杂性科学刚刚兴起时就把这个问题提到议事日程上来（钱学森，于景元，戴汝为，1990：3-10）。钱学森在研究开放的复杂巨系统时指出，研究开放的复杂巨系统必须采用新的方法，即从定性到定量的综合集成方法以及综合集成方法的研讨体系（王寿仁，于景元，戴汝为，1996）。这些方法实际上就是探索复杂性的独特方法之一。苗东升（1996）在《混沌学纵横谈》一书的第四章，对混沌研究的方法做了比较详细的论述，认为混沌研究方法主要包括建立模型、理论描述、数值计算、实验观测和哲学思辨等内容。中国科学院赵松年（1994）在探索非线性时，分为实验数学、元胞自动机、重整化群方法、散射反演方法和役使原理等五个方面，对非线性的研究方法做了比较系统的介绍。

此外，吴彤（2001）对自组织方法论做了比较全面的研究。他通过概括和总结各个自组织科学理论分支所蕴涵的方法意蕴，提出并阐述了自组织方法论整体框架，探讨了自组织条件方法论、自组织动力学方法论、自组织演化途径方法论、自组织结合途径方法论、自组织分形结构方法论、自组织演化图景方法论，以及自组织方法论与哲学的关系等。

在国外，复杂性方法论研究也已经被提到议事日程。复杂性科学的早期探索者们，例如贝塔朗菲（Bertalanffy，L. V.）、普里高津（Prigogine，I.）、哈肯（Haken，H.）等学者对复杂性科学的方法论及其对哲学方法论的影响就做过一些论述。当代复杂性科学的重镇——美国圣菲研究所（Santafe Institut）的复杂性研究者们，已经体会到了方法论变革的重要性，把计算模拟、隐喻类比方法引入复杂性科学中。圣菲研究所的第一任所长考温（Cowan，G. A.）等人主编了一本圣菲研究所复杂性研究系列文集：《复杂性：隐喻、模型和实在》。在这本文集中，圣菲的学者们对复杂性的各种研究方法做了初步的探讨（Cowan，1994）。圣菲研究所的卡斯蒂（Casti，J. L.）在《虚实世界》一书中，对复杂性的研究方法和工具，特别是计算机仿真进行了专门研究（1998）。霍兰（Holland，J. H.）在《隐秩序》和《涌现》两本专著中，把隐喻方法引进复杂性研究之中（霍兰，2001：219）。考夫曼（Kauffman，2003：84）和巴克（Bak，2001：7-12）等学者也对复杂性科学的方法论做过一些讨论。1999年，美国《科学》杂志在其编发的复杂性专刊中，其编者按的文章《超越还原论》，也是一种方法论探索的尝试。他们指出还原论虽然功名赫赫，但它依然有许多不足之处，并提出用一系列整体论的方法来补充主流的还原

论也许是有所裨益的,因此他们发出了超越还原论的号召。

此外,德国学者克劳斯·迈因策尔(Mainzer,1999)在《复杂性中的思维》一书中,从科学前沿探索与人类心智探险史的结合中,涉猎从物理世界的进化到生命世界的进化,从意识的起源到认知科学的兴起,从社会政治系统到社会经济系统的运行,从哲学史到哲学前沿的反思,阐述了探索复杂性将促使人们思维方式的变化,招致世人对共同未来的关注,从而对传统的科学思维和科学方法产生重大影响。他因此企图建构一个跨学科的一般方法论。法国学者埃德加·莫兰(Morin,E.)在《复杂思想:自觉的科学》等四卷本方法书系中,也从哲学层次对复杂性的研究方法及其对科学思维和科学方法的影响做了许多哲学沉思①。从总体来说,国外对复杂性方法论的哲学探索一般体现为复杂性探索中所运用具体方法上面(如计算机仿真、遗传算法等),而系统、全面的哲学研究尚没有全面展开。

复杂性科学的快速发展,特别是美国圣菲研究所对复杂性科学的全面探索为我们探讨复杂性科学中的方法论提供了丰富的原始材料。他们在探索复杂性的过程中所使用的方法也带有一定的普遍性和前沿性。他们出版的大量系列研究文集以及他们的网站、杂志为我们的方法论研究提供了极大的方便。他们对复杂性科学方法论的初步探讨也为我们全面、系统的方法论探索提供了许多有益的启示。全面探索复杂性科学方法论的时机已经到来,现在做这项研究工作既有必要,也有可能。

复杂性科学与传统科学有重大区别,它对传统的自然观、科学观、方法论,以及世界图景都产生了重大的影响。而在这些影响中,最根本的是方法论问题,一是因为复杂性科学研究活动中采用了新的方法,所以能够挖掘出传统方法难于挖掘出的内容,能够发现被遗漏的新东西;二是复杂性科学活动中所采用的新方法以及产生出来的新学科对传统的还原论和整体论都产生重大影响。以前总是在还原论和整体论之间跳来跳去,相互完全不相容,从复杂性科学的视角看来,这两种方法论都各有千秋,既各有缺失,又各有优势;因此,复杂性科学虽然说要超越还原论,但并不想取代还原方法,而是将两者有机地结合起来,发挥其优势,克服其缺点,形成互补的关系。本文将从哲学的视角,总结复杂性科学研究活动中采用了什么样的新的方法论原则和具体的研究方法,而要挖掘这些内容就要大量阅读复杂性科学的论文、专著,特别是关注美国圣菲研究所的科研活动和具体成果。我们还要再

① 分别是《复杂的思想:自觉的科学》、《迷失的范式:人性研究》、《方法:思想观念》、《方法:天然之天性》。

放开眼界，以更普遍的哲学眼光，去反思传统的方法论体系，对其进行批判、反思，从而继承和发展，以构成新的方法论体系。

第四节　复杂性科学方法论的研究意义

复杂性科学的兴起，除繁衍出一群新学科之外，还对传统的科学观念、科学方法，以及哲学本体论、认识论和方法论产生了重大的影响。在本体论方面，复杂性科学的兴起使科学世界图景的产生有了重大改变。在认识论上，复杂性科学的兴起对传统科学认识论形成重大冲击。在方法论上，复杂性科学与传统科学在研究方法上也有很大的差别：科学家们在探索复杂性时，采用了很多与传统科学方法不太一样的方法，如隐喻类比和哲学思辨等方法，因而拓展了科学方法的领域范围；从复杂性的思维框架来看，传统的还原论和整体论都各有千秋，既有需要发扬的一面，又有需要批判的一面，必须在复杂性的语境下对传统的方法论进行新的批判、继承和发展。因此，复杂性科学的兴起，既对科学观念和哲学思想产生重大冲击，需要科学哲学对复杂性科学产生的各种哲学问题作出哲学回应，同时也需要哲学工作者对其中的哲学思想及时总结，及时归纳，并梳理其中具有哲学意蕴的内容，以丰富我们的科学哲学。总之，复杂性科学的哲学研究已成为当代自然科学中的哲学问题研究的一个重要的前沿阵地。

科学方法论是科学技术哲学的重要组成部分，它是对科学活动及其成果的哲学概括和总结、反思，继而反过来又指导着科学工作者的科学活动。科学方法论与科学发展的历史是相互统一的。在科学发展的早期，比如古希腊、罗马时期，科学活动主要还停留在对科学对象的外观的模糊的整体的把握上，反映在科学方法论上就比较早地出现了朴素的整体方法论。从文艺复兴开始，随着开普勒、伽利略和牛顿等科学大师们利用分析解剖的方法取得一系列的重大科学成就之后，分析还原方法开始深入人心，并逐渐取得了正统的地位，成为科学方法论的主流。然而，随着科学研究的深入，人们发现分析还原方法并非万能，且日益显示出其局限性，于是有些领域特别是在生物界，综合、整体的方法又开始抬头。随着贝塔朗菲的一般系统论、维纳(Wiener，N.)的控制论等一系列以研究系统为对象的系统科学学科群的

兴起,综合整体方法逐渐走上了复兴之路。但值得注意的是,在复兴综合整体方法的同时,对分析还原方法却批判有加,甚至彻底否定。分析还原方法和综合整体方法对科学活动的作用究竟如何?还原论方法真的走到尽头了吗?整体论方法真的是万事灵通吗?我们在批判还原论的同时又怎样对它进行继承和发展?在复兴整体论的同时,我们又怎样克服它的固有缺陷?如何正确评价这两种方法论?是相互排斥还是走向新的综合?正在兴起的复杂性科学对传统科学方法论提出了挑战,也为科学方法论的新发展提供了契机。

复杂性方法论的哲学探索,是一项颇有意义的工作。本书的理论创新主要在如下几个方面:一是我们将复杂性方法论分为三个层面,即复杂性科学活动层面、复杂性科学层面和复杂性哲学层面,由这三个层面的方法和方法论构成复杂性科学的方法论体系;二是归纳总结出复杂性科学的具体方法手段,有利于复杂性科学研究的进一步展开;三是在复杂性语境中展开对传统方法论的批判、继承和发展,并对还原论和整体论给出一个合理、公正的评价,并在复杂性科学语境下建立一个新的互补方法论体系。

第二章
复杂性科学的兴起

要探讨复杂性科学的方法论，我们首先应对复杂性和复杂性科学有所认识，比如我们怎样来理解复杂性？复杂性和复杂性科学是怎样兴起的？复杂性科学为什么现在才兴起？哪些背景因素影响和促成了复杂性科学的兴起？这些问题的探讨是我们探讨复杂性方法论的知识基础。

第一节 复杂性语义的复杂性

复杂性科学无疑是研究复杂性，然而对复杂性究竟是什么这一根本的问题，其答案却是见仁见智，歧见纷争，以至于这个问题常常困扰着研究者。正因如此，有些人认为复杂性科学由"复杂性"(complexity)走向了困惑性(perplexity)(Horgan,1995)。

一、复杂性语义的复杂现状

据美国记者约翰·霍根(Horgan,J.)在其著作《科学的终结》(1997:329)中所讲，麻省理工学院的物理学家塞思·劳埃德(Lloyd,S.)通过电子邮件向他提供了一份复杂性定义的清单，经统计，有45种之多(后面括号中的人名是定义的提出者)：

①信息(Shannon)；②熵(Gibbs；Boltzmann)；③算法复杂性；④算法

信息含量(Chaitin, Solomonoff, Kolmogorov);⑤费希尔信息;⑥熵(Renyi);⑦自描述代码长度(Huffman Shannon-Fanna);⑧矫错代码长度(Hamming);⑨信息(Chenoff);⑩最小描述长度(Rissanen);⑪参数个数或自由度或维数;⑫复杂性(Lempel-Ziv);⑬共有信息或通道容量;⑭演算共有信息;⑮相关性;⑯储存信息(Shaw);⑰条件信息;⑱条件演算信息含量;⑲计算熵;⑳分维数;㉑自相似;㉒随机复杂性(Rissanen);㉓混和(Koppel, Atlan);㉔拓扑机器容量(Crutchfield);㉕有效或理想的复杂性(Gell-Mann);㉖分层复杂性(Simon);㉗树形多样性(Huberman, Hogg);㉘同源复杂性(Teich, Mahler);㉙时间计算复杂性;㉚空间计算复杂性;㉛基于信息的复杂性(Traub);㉜逻辑深度(Bennett);㉝热力学深度(Lloyd, Pagels);㉞规则复杂性(在 Chomsky 层中位置);㉟信息(Kullbach-Liebler);㊱区别性(Wooters, Caves, Fisher);㊲费希尔距离;㊳分辨力(Zee);㊴信息距离(Shannon);㊵演算信息距离(Zurek);㊶距离(Hamming);㊷长幅序;㊸自组织;㊹复杂适应系统;㊺混沌边缘。

著名的《科学》(*Science*)杂志 1999 年 4 月 2 日的“复杂性研究”专刊发表了 8 篇复杂性的文章,但因为没有统一的复杂性的定义,专题采用了“复杂系统”的名称,而究竟什么是复杂性则由作者在自己的领域去定义。美国的 *Emergence* 杂志 2001 年第 3 卷第 1 期专门探讨了“什么是复杂性科学”的问题。该期杂志共发表了 9 篇论文和 1 篇编者导言,从多个方面解读复杂性科学是什么的问题。结果也因没有一个共同的复杂性定义,而是由作者从知识、科学、哲学、自然史、组织管理和组织叙事研究中自己去体认复杂性的含义。由此看来,复杂性科学研究的领域实在是太广泛了,放眼当代科学,几乎每个学科领域都有自己的复杂性科学,每个研究者对复杂性都有自己的见解,就像维纳(1962:2)在控制论创立之时所描述的一样,“这些专门化的领域在不断增长,并且侵入新的疆土。结果就像美国移民者——英国人、墨西哥人和俄罗斯人同时侵入俄勒冈州所造成的情形一样——大家都来探险、命名和立法,弄得乱七八糟、纠缠不清。”因此,外行人甚至内行人对复杂性是什么总是一头雾水,给人复杂性的语义本身过于复杂的感觉,难怪西利尔斯(Cilliers, 1998:8)会说:“复杂性是复杂的。”

二、复杂性的语义溯源

复杂性这个词并非古已有之,而是有一个演变的过程。它首先是由形容词“复杂”这个日常语言用语演变而来,逐渐变成了一个科学语境下的复

杂性这个名词。无论在汉语还是在英语、古希腊语中都有这个嬗变过程。

在现代汉语的词典中，我们还找不到“复杂性”这个名词，但我们可以找到“复杂”这个词。在汉语中，“复杂”是一个复合词，由“复”和“杂”两个字组成。“复”字的辞源是这样的：原始时代的居民，经历过由山中穴居到平原半穴居的阶段。这种半穴居，是在平地挖坑，上覆以茅草斜顶，人居坑中，而于坑中的两侧凿有供人上下出入的台阶。甲骨文的复字，其上部即像这种两侧有上下台阶的半穴居址的俯视形，其从止（趾），表示人出入居室之意。其本义为往返、返回（谢光辉，2000：312）。《说文解字》：“复，行故道也。”由此引申为繁复、重复。其实，在这种往复、重复中，也就蕴涵了某种规律性的东西。“杂”，古体字写作“雜”、“襍”，由衣、集会意，表示各种衣服聚集在一起，颜色混杂不一的意思，其本义即指五彩相合，颜色不纯，引申为混合、搀糅、聚集、错杂等义（谢光辉，2000：302）。《说文解字》：“杂，五彩相会。从衣，集声。”如今的杂字，从九，从木，成了多种树木相混合了。但无论如何，“杂”字都有多个东西混合在一起的意思。“复”和“杂”从什么时候起组合成复合字？笔者没有进行详细的考证。《辞海》对“复杂”一词的解释是：

> “①事物的种类、头绪等多而杂乱；问题复杂；②在系统论中，同‘简单’相对，表征事物或系统的组织水平的范畴。指事物或系统的多因素性、多层次性、多变性以及相互作用所形成的整体行为和演化。一般认为，非线性，不确定性，不稳定性等是复杂性的根源。”

总之，在汉语中，从辞源上来说，“复”表示反复且多样，因而有规律可循，而“杂”又表示多且乱，杂乱无序，因而无章可循。“复杂”将无序和有序结合起来，介于有序和无序之间，因此才显得“复杂”，这与当代的复杂性理论是很契合的。

在英语中，“复杂性”对应于名词 complexity，“复杂”对应于形容词 complex。在《牛津高级英汉双解词典》中，对形容词 complex 解释为：①由密切联系的部分组成的；联合的；复合的；②（因由很多部分）难于理解或解释的。而在该词典中，对 complexity 的解释是：错综复杂的状态；复杂的事物。诺贝尔奖得主盖尔曼（Murray Gell-Mann，1995/1996）曾追溯过 complex 的词源。complex 来源于拉丁语 complexus，complexus 又从拉丁语词 complecti 转化而来。complexus 为名词或形容词，complecti 为动词，它的意思就是拥抱、怀抱、围绕、编织。complecti 由拉丁语动词 plectere 加前缀 com 组合而成，com 的意思是合在一起。在印欧语系中，词根 plek 来源于拉丁语动词 plicare，意思是折叠，缠绕（to fold），其过去分词为 plexus，意思是编成辫子状或编成麻花

状(braided,entwined)。Plexus 对应的希腊语是 πλεκτος(plektos),意思也是编织在一起。由此就导出了 complexus 一词,从字面上理解就是编织在一起。由上述的辞源分析可知,complex 的最早的意思就是编辫子、缠绕、编织,后来它的意思转化为把许多东西结合到一起。《牛津科学词典》(*Oxford Dictionary of Science*:160)对复杂性的解释是:"复杂性是系统自组织的水平的衡量。在物理系统中,复杂性与对称性破缺相关,也是系统所具有的、能够产生相变的不同状态的能力。它也与大跨度的空间连通性相关。"

综观以上汉语和英语、拉丁语的解释,"复杂"(complex)的词义内容包括两个方面:本体论方面,它指事物的组成多且杂;认识论方面,它指难于理解和解释,不容易处理,不清楚。"复杂性"(complexity)就是指"复杂"的性质或状态。

日常生活中人们一直广泛地使用复杂、复杂性、复杂系统等词语,人们总是通过比较来判断事物是简单的还是复杂的,但复杂事物与简单事物究竟有什么本质上的区别却并不清楚。人们发现,对同一事物,有的人觉得复杂,另一些人则会觉得简单。比如,一台电脑的内部结构,对外行人来说,十分复杂,无从下手,但对行家来说,却又十分简单。可见,复杂性的感受因人而异。同一事物,从不同的层次和角度看,复杂性也不一样。同样是一台电脑,从集成电路板来说,是简单的,只是几块集成电路块的组合而已;但从集成电路的内部结构来说,一个小小的集成块包含了数以百万计的电路,极为复杂。那么是不是存在判定复杂性的客观标准和尺度呢?在日常生活中,关于简单与复杂至少包含以下几点:①简单与复杂没有绝对的界限,但总能找到一些方面可以进行比较;②复杂性的判断和感受因人而异,涉及各人的知识背景和对该项工作的熟悉程度;③复杂是相对于一定系统和层次而言的,离开具体的系统和层次难以判断简单与复杂。总之,在日常语言中,复杂性成了认识的避难所,凡是难于认识、不好认识的东西,我们常常一言以蔽之,归咎为:它太复杂了。

三、国外学者对复杂性的界定

一般认为,复杂性科学是从贝塔朗菲开始的,他初步提出了一个反还原论的复杂性范式,但他并没有直接提出过复杂性的概念。信息论创始人之一韦弗尔(Warren Weaver,1948:536-544)在《科学与复杂性》一文中,把科学对象分为三类:简单性、无组织的复杂性和有组织的复杂性。同时正式提出复杂性和复杂性科学的概念,但他也没有确切定义过复杂性。普利高津

(1986)是一位真正比较早提出"探索复杂性"的口号，并身体力行建构复杂性科学的人，但他所说的复杂性还只是自组织的别称；也就是说，他把复杂性等同于自组织，把复杂性的基本要素等同于自组织的要素，《探索复杂性》全书所研究的都仅是自组织现象。

计算问题是20世纪三四十年代哥德尔、图灵等一批数理科学家在研究数学问题的可解性时提出的，并把数学问题分为可解、难解和无解三类。随着计算机技术的兴起，为了更有效地使用计算时间和存储空间，20世纪60年代逐渐发展出计算复杂性理论。所谓计算就是一组符号串的变换，从一个已知符号开始，按照一定规则，经过有限步骤，最后得到一个满足预先规定的符号串，这种变换过程就是计算。计算复杂性(computational complexity)的含义是指解决一个问题所耗费的计算资源的数量，其中计算资源主要包括空间和时间。一般地说，时间上的计算复杂性即一个计算机描述一个系统(或解一个问题)所需要的时间；空间上的计算复杂性即描述一个系统所需要的计算机存储量(堵丁柱，葛可一，王洁，2002:67)。计算复杂性的基本信念是：我们可以把解决问题的时间、空间耗费的代价来作为该问题的复杂性的测度，并据此判断该问题是否属于难解的复杂性问题，在认识论意义上可视为主体有效解决对象的认识难度所付出的代价。随着计算机存储技术的发展，计算需要与存储空间的矛盾变得不是很突出了，计算时间的耗费成为衡量计算复杂性的重要内容。对计算时间耗费的研究发现，影响计算速度的一个关键因素是时间函数的次数，多项式时间耗时最少，指数增长的时间函数，其计算时间复杂性随时间增长最快。

描述复杂性(description complexity)，也称算法复杂性(algorithmic complexity)。其概念主要是由科尔莫格洛夫(Kolmogorov, A. N.)、蔡廷(Chaitin, G. J.)和索罗莫诺夫(Solomonoff, R. J.)在20世纪60年代中期分别独立提出的，又称为科尔莫格洛夫复杂性。描述复杂性起源于概率论、信息论以及关于随机性的哲学思考，并随着算法理论的发展而走向成熟(李明，威塔涅，1998:32-34)。所谓算法即解题过程的精确描述和求解某类问题的通用规则或方法，即符号串变换的规则。对算法的一个非形式的描述将算法称为：一组(有限个)规则，它为解某个特定问题提供了一个运算序列。直观地说，求解某一个或一类问题的算法就是一组规则。在计算机科学里，算法是计算机解题方法的精确描述或者是计算机解题的程序。

科尔莫格洛夫对描述复杂性定义如下(吴彤，2004:27)：对每一个 D 域中的对象 x，我们称最小程序 p 的长度 $|p|$ 就是运用指定方法 S 产生的关于对象 x 的复杂性。对计算机 S 而言，设给定的符号串为 x，将产生 x 的程序记

为 p。对一个计算机来说，p 是输入，x 是输出。粗略地说，关于一个符号串 x 的科尔莫格洛夫复杂性，就是产生 x 的最短程序 p 的长度。上述定义可写为

$Ks(x) = \min\{|p|: S(p) = n(x)\}$，

$Ks(x) = \infty$，如果不存在 p.

其中 $Ks(x)$ 即科尔莫格洛夫复杂性。后一个公式的含义明显，即如果传送的符号串完全杂乱无章，找不到任何规律（即程序 p），那么，复杂性就等于符号串本身，而符号串是无规则的无穷数，复杂性即无穷。

在描述复杂性中，越是随机性的东西越复杂。蔡廷在他对信息理论的解释中，也就是他称之为"算法信息理论"中，用"不可压缩性"来诠释随机性。按照信息被压缩的方式，他对复杂性是这样界定的：序列的复杂性等同于生成序列所必需的最小程序的长度（P. Cilliers，1998：9）。描述复杂性的基本信念是：在一给定粗粒度下，存在一种通用的描述方法使得一个数据集的最短长度描述能体现出这个数据集的本质规律，比较不同对象数据集的"最短长度描述"，我们就可以确切地判断出对象的复杂性程度的高低。

由于描述复杂性依赖于描述语言、背景知识和粗粒化程度，具有一定的主观性。为了克服这种主观性，盖尔曼（1997：34）提出了原始复杂性的概念。他把原始复杂性定义为"用双方事先共享（且彼此均知道事先共享这一事实）的语言、知识及理解，将一个已知粗粒化程度的系统描述传给远处某人时，所用最短信息的长度。"在原始复杂性中，双方拥有共同的语言、知识及理解，避免了描述复杂性的随意性，具有了一定的主体间性。

代数复杂性具有与描述复杂性、原始复杂性相似的内涵，他是指解决一个问题所需要的代数计算次数，用它可以标度所解决问题的复杂程度。但是对于同一个问题，由于采用的计算方法不同，解决该问题所需要的计算次数也不同，因此代数复杂性依赖于算法。

20 世纪 50 年代，乔姆斯基（N · Chomsky）把串行生成语言分成从简单到复杂的四大类：正规语言、上下文无关语言、上下文有关语言、递归可数语言。60 年代又出现了对并行生成语法的分类体系，称为 L · Lindemayer 分类。这两类分类体系虽然不同，但都是对形式语言的复杂性的度量。语法复杂性就是对形式语言的复杂性的测度（郭元林，金吾伦，2003：25）。

德国学者克拉默（Cramer，F. 2000：285）利用系统来定义复杂性。他认为："复杂性可以定义为系统表明自身方式数目的对数，或是系统可能状态数目的对数：$K = \log N$，式中 K 是复杂性，N 是不同的可能状态数。"他还以算法复杂性为基础定义了亚临界复杂性、临界复杂性和根本复杂性。所谓亚临界复杂性是指系统表面复杂但其实很简单，或许是算术性的。所谓临界

复杂性是指在复杂性的特定阶段——在它的临界值上——开始出现某些结构。最简单的情况是对流和对流图案形式。所谓根本复杂性是指“只要系统有着不确定性解或混沌解就是根本复杂的”(2000:290),“一旦程序的大小变得与试图描述的系统可以相提并论,不能再对系统进行编程,结构不可辨识时——即当描述它的最小算法具有的信息比特数可与系统本身进行比较时——我称之为根本复杂性。根本复杂性的这个定义是以科尔莫格洛夫的方程为基础的。”(2000:290)按照克拉默的认识,根本复杂性相当于无法认识。根本复杂性即那些表现得完全随机性、描述结果与被描述对象可以相提并论,完全无法获得规律性认识,简单地说,无法辨识即根本复杂性。所以,根本复杂性等于完全随机性。

算法复杂性和根本复杂性都以随机性来测度复杂性,认为越随机的东西就越复杂。这样就会得出结论说,猴子在计算机键盘上随便敲出的字符串要比莎士比亚的伟大作品具有更大的复杂性。另外,算法复杂性还具有不可计算性,即对于一个字符串,我们无法找到导致进一步压缩的所有理论、算法和规则,所以我们只能确定算法复杂性的上限值,而无法找到它的下限值。为此,盖尔曼提出了有效复杂性来克服这些缺陷。所谓“有效复杂性,大致可以用对该系统或数串的规律性的简要描述长度来表示”(盖尔曼,1997:34)。假定所描述的系统根本没有规律性,虽然在具有给定长度的比特串中,随机比特串的 AIC(算法信息量)最大,但是其有效复杂性却为零(盖尔曼,1997:57)。另一个极端情况是比特串完全规则,比如全由 1 组成,其有效复杂性也非常接近于零,因为“全部为 1”的消息是如此之短。因此,盖尔曼提出,要想具有更大的有效复杂性,AIC 既不能太高,也不能太低。换句话说,系统既不能太有序,也不能太无序,有效复杂性处在完全有序和完全无序之间的中间地带。

美国气象学家洛仑兹(Lorenz,E. N.)(1987:156)认为,“实质上,复杂性常常用来指对初始条件的敏感依赖性以及与这种敏感依赖性相联系的每一件事。”混沌与复杂性的区别是:混沌涉及时间上的不规则性,而复杂性则意味着空间上的不规则性。这就是说,他把复杂性等同于空间上的不规则性。

司马贺(2004:171)则提出了分层复杂性的概念。所谓分层复杂性就是指复杂系统的层次结构。复杂系统由子系统构成,这些子系统又有它们的子系统,如此一层一层地组成复杂系统,形成层次结构。他的分层复杂性以复杂系统为基础,并认为层次系统的进化速度较规模相当的非层次系统快得多。

美国圣菲研究所的人工生命之父朗顿(Langton,C. G.)把复杂性理解为

混沌边缘,他在元胞自动机中提出这样一个假说:对于元胞自动机来说,能完成复杂计算的规则,最有可能在有序和混沌状态之间转变的相变阶段(即混沌边缘)被发现。后来,由于《复杂性:诞生于秩序和混沌边缘的科学》和《复杂性:混沌边缘的生命》两本畅销书都使用了这个词,因此混沌边缘成为复杂性定义的时髦词汇。混沌边缘的一般意义为:"在高度有序和稳定的系统(比如晶体)内部不可能诞生新生事物;另一方面,完全混沌的或非周期的系统,比如处于湍乱状态的流体或受热气体,则将趋于更加无形。真实的复杂事物——变形虫、契约贸易者以及其他一些类似的东西,则恰好处于严格的有序和无序之间。"(约翰·霍根,1997:292)

巴克(Bak,P. 2001:32)等人则把复杂性理解为自组织临界性。所谓自组织临界性指的是一类开放的、动力学的、远离平衡态的、由多个单元组成的方向系统能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态;处于临界态的一个微小的局部扰动可能会通过类似"多米诺效应"的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统而形成一个大的雪崩。临界态的特征为,处于临界态的系统中会出现各种大小的"雪崩"事件,并且"雪崩"的大小(时间尺度和空间尺度)均服从"幂次"分布。

把计算复杂性与算法复杂性结合起来,就得到复杂性的另两个概念——逻辑深度和隐蔽性。逻辑深度的含义为:在普适计算机(图灵机)上执行前面最短程序所耗费的计算资源,该计算资源主要指时间,可用指令步数时钟拍数来度量。一个信息串的隐蔽性是指图灵机找到能导致计算机打印该信息串,然后停机的一个较短程序所需要的最少时间。一本繁难的数论著作,其描述复杂性的可能性很小,因为所有定理都可以从开始的几条基本定义来推出,但这本书却可以有很大的"深度",因为推导的过程是耗费时间的。"深度"表明了演化的历程。一个经历了漫长演化的系统,如地球就具有很大的深度。盖尔曼指出,对计算机来说,深度最大而需要计算机"深入思考"的问题,是那些处于有序和无序中间的问题,这一点与有效复杂性相同。

霍兰(2001:49)则把复杂性看做是一种"隐秩序",一种系统的"涌现性",认为是适应性造就了复杂性,并把复杂系统称为复杂适应系统。在霍兰看来,复杂性其实就是系统的一种涌现。

法国的E·莫兰更有意思,认为"复杂性是辩证法的同一"。他说:

> 今后科学思想在所有的部门要考虑有序和无序、偶然性和必然性之间的联合,或者用我的话来说是其间的重要性逻辑。这里值得注意

的是这个联合，这个两重性逻辑构成了复杂性本身。complexity（复杂性）等于交织在一起的东西。我们的现象宇宙是由有序、无序和组织不可分割地交织构成的。这些概念同时是互补的和（当涉及到有序和无序时）对立的，甚至是矛盾的。这向我们表明复杂性是这样一个逻辑概念，它把一和多统一起来形成 complexity（复杂性）的 unitas mulitiplex（多样性统一），把互补性和对立性统一起来形成两重性的逻辑统一，或者如某些人喜欢说的辩证法的统一。达到复杂性的思维从而意味着达到思想上的用双目视物而放弃只用独眼的思想方法。（2001:170-171）

这样界定的复杂性概念，与前述的混沌边缘及有效复杂性有点类似，但也存在较大的差别。混沌边缘、有效复杂性强调复杂性只能出现在有序和无序之间，但莫兰却认为复杂性视有序和无序的对立统一。因此，莫兰把复杂性概念大体等同于辩证唯物主义的矛盾概念，即事物的对立统一性。

美国匹兹堡大学莱谢尔（Rescher，N.，1998:9）从哲学观上总结了复杂性概念，给出了一个复杂性概念的分类（见表 2.1）。

表 2.1　复杂性概念的分类

认识论模型	计算复杂性（formulaic complexity）	描述复杂性（descriptive complexity）
		生成复杂性（generative complexity）
		计算复杂性（computational complexity）
本体论模型	组分复杂性（compositional complexity）	构成复杂性（constitutional complexity）
		分类复杂性（taxonomical complexity）（异质，heterogeneity）
	结构复杂性（structural complexity）	组织复杂性（organizational complexity）
		层级复杂性（hierarchical complexity）
	功能复杂性（functional complexity）	操作复杂性（operational complexity）
		通用复杂性（nomic complexity）

他自己在著作中则更倾向于使用认识论意义的复杂性概念，即计算复杂性概念。他利用这种复杂性概念探讨了获得知识、科学的极限问题。

四、国内学者对复杂性的理解

在国内，对复杂性也有不同的理解，比较典型意义的有钱学森、颜泽贤、苗东升、吴彤和陈忠等对复杂性的定义。

钱学森是国内接触复杂性理论最早并敏感地意识到它是21世纪的新科学的学者之一。国外学者给复杂性下的定义有几十种之多,各自反映了复杂性的某些特征,其中有些很难说是真正的复杂性。钱学森以系统再分类为基础,提出了他对复杂性的界定。他认为复杂性可概括为:

> ①系统的子系统间可以有各种方式的通讯;②子系统的种类多,各有其定性模型;③各子系统中的知识表达不同,以各种方式获取知识;④系统中子系统的结构随着系统的演变会有变化,所以系统的结构是不断改变的。(2001:199)

在复杂性问题上,国外学者往往从抽象的定义出发,所以造成争论不休,因而使复杂性走向了"困惑"。钱学森却从实际出发,从方法论角度来区分复杂性和简单性的问题。如果仅从概念出发,不仅难于统一认识,甚至会抓不住事物的本质,反而把复杂性简单化,或把简单性复杂化了。钱学森的过人之处在于,他绕开抽象的概念,从方法论上来认识复杂性。他在20世纪80年代就指出:"凡现在不能用还原论方法处理的,或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复杂性问题"。对复杂性的性质问题,国外学者说得很玄乎,钱学森却一语道破天机:"所谓复杂性实际上是开放的复杂巨系统的动力学"(2001:456),"复杂性是开放的复杂巨系统的特征"(2001:541)。对开放的复杂巨系统不能用还原论的方法,还原论方法只能在简单巨系统有效。

颜泽贤等人(1993:50)在其《复杂系统演化论》中,对复杂性定义如下:"1.复杂性是客观事物的一种属性;2.复杂性是客观事物层次之间的一种跨越;3.复杂性是客观事物跨越层次的不能用传统的科学理论直接还原的相互作用。"其实,这个定义无非是表达了这样的意思:复杂性是跨越层次之间的不可以直接还原的相互关系。它以层次性为基础,强调层次的跨越,客观事物只有在层次跨越时才能表现出复杂性。这个定义与分层复杂性有点相似,但其哲学意味要更浓厚得多。

苗东升(1993:9)从分形角度对汉语中"复杂"一词进行了解读。在苗东升看来,汉语中的"复杂"一词是由"复"和"杂"两个字组合而成。"复"的含义指多样性、重复、反复,形成某种层次嵌套的自相似结构,即系统包含极其多的层次,不同层次(不同尺度)上都显现出(重复着)相同的精细结构,所看到的图像是一致的,部分与整体之间具有结构上的相似性。"杂"的含义是指多样、破碎、纷乱,形成某种不规则的无序的结构。苗东升强调了几种情况:无"复"者,"复而不杂"者;不"杂"者,"杂而不复"者,"既复且杂"者。他

认为只有“既复且杂”者具有分形结构，从而涌现出复杂性。在他看来，“复”意味着规律性，“杂”意味着非规律性，“既复且杂”所指称的复杂事物是，既具有我们所能识别的规律性（重复性），又不能完全归于某种规律，也不能完全陷入无规律性，这与盖尔曼的“有效复杂性”的含义完全契合。他还曾撰文探讨了复杂性的13类复杂性的根源：系统规模、系统结构、开放性即环境、动力学特征、非平衡态、不可积性、不可逆过程、非线性、不确定性、主动性与能动性、系统组分智能、人类理性、人类非理性等。在分析完这些复杂性的根源后，他说：“上述考察虽不完备，至少可以表明的确存在本质上属于复杂性的对象领域，简单性与复杂性有性质上的区别。”（2003:87）我们从他的关于复杂性根源的分析中，很明显地看出他的复杂性与简单性的划界大体上是以系统科学以前的传统科学为标准和框架的，传统科学能够解决的是简单性问题，不能解决的就是复杂性问题。

吴彤（2001:45-47）提出了客观复杂性的概念，客观复杂性包括三个方面：结构复杂性、边界复杂性、运动复杂性。

（1）结构复杂性指系统内部要素之间通过相互作用构成的排列组合的复杂性；

（2）边界复杂性指系统与环境的交界处通过相互作用产生的复杂性。边界不是没有质量、没有宽度、没有面积、不占空间的数学意义的线，而是由系统与环境的界限与跨界限部分组成。其中结构复杂性又可分为：分形结构复杂性（指系统内部结构具有多层次、多部分，且各个部分相互联结、嵌套、递归；整形则是简单的。）和非稳定结构复杂性（局部非稳定的结构具有多个分岔点、鞍点，它同时也是复杂性的结构；相反，结构整体和局部稳定者就是简单结构。）。

（3）运动复杂性又可分为：分岔运动复杂性（如果运动过程中存在分岔，存在选择性的不同道路，这种运动是复杂性运动；反之，则是简单性运动。）；突变运动复杂性（指运动曲线或轨道非光滑有突跳的运动。运动曲线光滑、连续的运动则是简单的运动。）；混沌运动复杂性（指运动的相邻轨道永不相交、同时又相互分离的非周期运动。运动相邻轨道相交的、有周期行为的运动则是简单运动）。同时，他指出客观复杂性具有不稳定性、多联通性、非集中控制性、不可分解性、涌现性和进化能力的多样性。

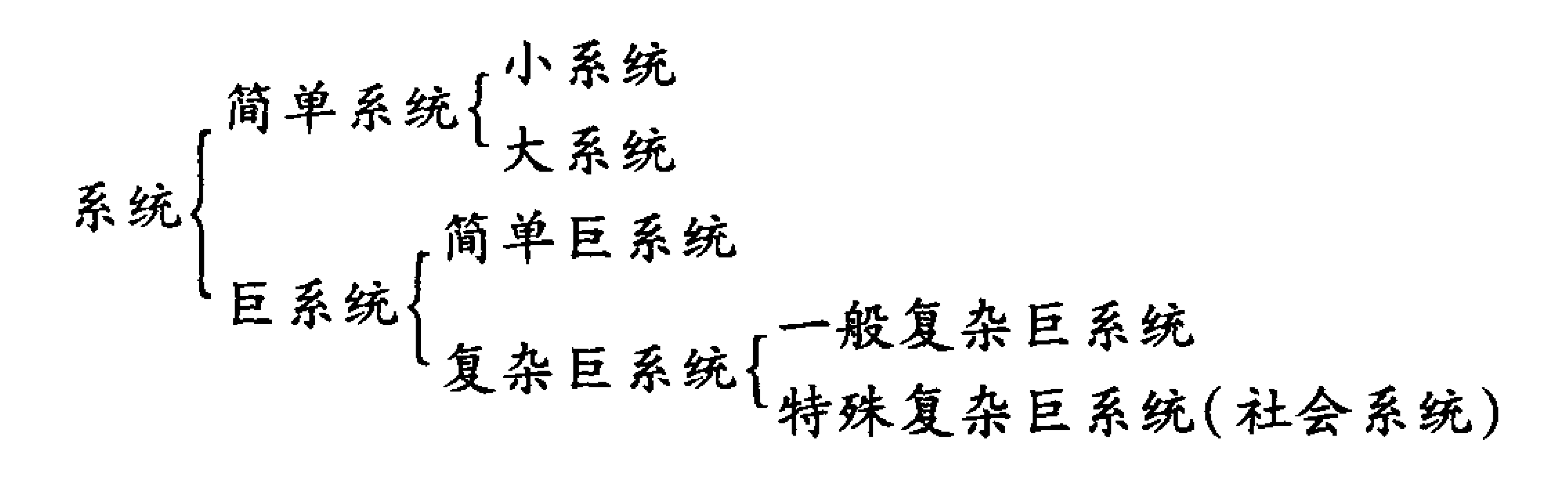
第二节 复杂性科学的基本特点

复杂性科学已经走过了20个年头，并且在许多方面都已经取得令人瞩目的成就，一些分支学科也逐渐成熟起来，其基本特色也逐渐显示出来，复杂性范式也在形成之中。

一、复杂性科学的研究对象：复杂系统

复杂性科学本来是以复杂性为研究对象的，但通过上节的分析，我们知道复杂性的语义还真是复杂，特别是复杂性科学涉及的领域、学科、范围都很广阔，因此，也就没有统一和具体明确的复杂性定义。有鉴于此，人们把复杂性科学的研究对象扩展为复杂性和复杂系统，有时甚至干脆称复杂性科学的研究对象就是复杂系统。美国的《科学》杂志1999年4月出版的复杂性科学专辑的题目就是“复杂系统”。据编者在导言中解释，他们之所以采用“复杂系统”这个术语，是为了避开术语上的雷区，渴望避开语义上的争论；“复杂性”的意义由每位作者到自己的学科中去具体地定义，没有统一的“复杂性”。复杂性科学的专门机构——美国圣菲研究所，也认为复杂性科学的对象是复杂系统，这从该所的建所宗旨上看得非常明显：“该机构的建立是为了发展关于复杂系统及其简单的组成部分的研究……理解复杂系统对于充分发挥科学的潜力能够起到关键的作用；同时，理解复杂系统由希望产生巨大的智力和实践价值。”（Cowan，G. A. 1994，扉页）圣菲研究所的基本研究对象就是复杂系统，目的是寻求关于复杂系统的统一理论。

我国著名科学家钱学森（1990：3-10）也是从对系统的再分类开始他的复杂性科学的，并且认为复杂性科学的对象是开放的复杂巨系统。对系统的全面的细致的分类是钱学森探索复杂性的前提。通过长期的探索，钱学森及其系统学讨论班逐渐地认识到，系统是一个有着丰富内涵的概念，必须作出全面的分类，才能为复杂性科学找对自己的研究对象。钱学森对系统再分类的依据是子系统的数量以及它们的关联关系的复杂程度。他的分类结果如下：



钱学森认为,根据组成子系统以及子系统种类的多少和它们之间的关联关系的复杂程度,可把系统分为简单系统和巨系统两大类。简单系统是指组成系统的子系统比较少,它们之间的关系比较单纯。某些非生命系统,如一台机器,就是一个小系统。如果子系统数量相对较多(如几十、上百),如一个工厂,则可称为大系统。不管小系统还是大系统,研究这类简单系统都可以从子系统相互之间的作用出发,直接综合全系统的运动功能,可以运用牛顿力学的方法进行分析,最多要使用大型计算机。

若子系统数量非常大(如成千上万、上百亿、万亿),则称为巨系统。若巨系统中的子系统种类不太多(几种、几十种),且它们之间关联关系又比较简单,就称作简单巨系统,如激光系统。研究处理这类系统由于子系统众多,无法一一准确描述每一个子系统的运动,但由于子系统之间关系简单,因此可以略去细节,用统计力学方法和热力学熵的方法来研究。耗散结构和协同学就是研究简单巨系统的理论。

如果子系统种类很多并且有层次结构,它们之间关联关系又很复杂,这就是复杂巨系统。如果这个系统又是开放的,就称为开放的复杂巨系统。例如:生物体系统,人脑系统、人体系统、地理系统(包括生态系统)、社会系统、星系系统等等,它们又有包含、嵌套的关系。这些系统无论在结构、功能、行为和演化方面,都很复杂,以至于到今天,还有大量的问题我们并不清楚。如果系统中还有人的参与,具有学习和适应能力,就是社会系统,钱学森认为这样的系统是特殊的复杂巨系统。对于开放的复杂巨系统,由于组分种类繁多,子系统之间的非线性相互作用异常复杂,关联方式具有非线性、不确定性、模糊性和动态性等;系统还具有复杂的层次结构,时间、空间和功能等层次彼此嵌套,相互影响;系统与环境还有相互作用,系统具有主动性、适应性和进化性等,因此,使用传统的研究方法,都无法解决开放的复杂巨系统的问题,因为目前还没有形成从微观到宏观的理论,也没有从子系统的相互作用构筑出来的统计力学,因此需要提出新的研究方法和方法论。为此,钱学森建设性地提出了他们的从定性到定量的综合集成方法。钱学森把开放的复杂巨系统作为复杂性科学的研究对象与其他学者把复杂系统

作为复杂性科学的研究对象,其实质是一致的,不过钱学森把复杂系统做了更加精细的分类。

那么,什么是复杂系统呢?对此也有各种各样的看法,我们可以从复杂系统的特征入手来认识它。最典型也是最为大家接受的观点是西利尔斯(Cilliers,P. 1998:3-5)在《复杂性与后现代主义》一书中对复杂系统总结出十个方面的特征。概括、归纳之后,十大特征可以简化为六大特征:

(1)组分数目巨大:复杂系统拥有数目巨大的组分,系统因规模增大而复杂。

(2)组分间存在着复杂的相互作用:相互作用不一定只是物理性质,还可能是信息的交换;相互作用必须达到一定的程度;相互作用是非线性的;组分间作用较为直接、短程;相互作用有反馈回路。

(3)开放性:复杂系统一定是开放系统,会与环境相互作用。

(4)远离平衡:系统必须远离平衡,存在持续的能量流维持系统的组织。

(5)路径依赖:复杂系统都是有历史的,它们不仅是在时间中演化,而且现在的行为依赖于过去。

(6)分布参数:任何组分个性都无法预知自己的行为会对整体产生怎样的影响,复杂性是组成个体间丰富的相互作用的结果,但这些组分个体(适应性主体)却只能对与自身相关的信息作出反应。

除西利尔斯外,其他学者也对复杂性系统的总体特征进行过归纳。例如,《大英百科全书》中关于系统科学中"复杂性"的属性,描述了八种特征:①不可预测性;②连通性;③非集中控制性;④不可分解性;⑤奇异性;⑥不稳定性;⑦不可计算性;⑧涌现性(http://www. members. eb. com.)。方锦清(2002:8-10)将复杂系统的基本特征概括为具有非线性、多样性、多重性(或多层性)、多变性、整体性、统计性、自相似性、非对称性、不可逆性和自组织临界性等十大特性。吴彤(2001:44-47)则把复杂系统的特征归为不稳定性、多连通性、非集中控制性、不可分解性、涌现性、进化过程的多样性以及进化能力等六个方面。总之,从复杂系统的特点来看,复杂性科学注意研究对象的完整性,注意构成对象系统的要素之间的联系性,更注意由部分组成整体之后的涌现性。

二、复杂性科学的地位、体系和内容

在古代,科学是作为一个整体来进行研究的,但自文艺复兴以来,西方科学迈入了近代进程,探索科学的方法也换了一个样子。通过培根等人对

科学方法的探索和伽利略、牛顿等科学大家的示范，分析、还原的方法取得了极大的成功，科学整体变成了分门别类的数学、物理、化学等传统学科。于是分析还原的方法也就取得了正统地位，似乎成了科学研究的唯一方法。应该承认，近现代科学之所以能取得如此巨大的进步和成功，分析还原方法是功不可没的。通过这种方法，我们把这个世界分成诸多的研究对象，分门别类地进行了研究，建立了一门门成熟的科学门类。

但传统科学方法也有失误之处，比如，它们都忽视了事物之间的有机联系，路子也因此越走越窄，各个学科似乎越发感觉走到了尽头。正是在对传统科学的分析还原方法的反动中，从20世纪下半叶兴起了一场"系统运动"（朱志昌，2000:592）。在这场运动中逐渐形成了1940年代的一般系统论、信息论、控制论；1970年代的耗散结构论、协同学、突变论；1980年代的混沌理论、分形理论等。这些学科群共同形成了钱学森（1998）称之为"系统科学"的一个新的科学部门。系统科学把事物看作系统，从系统结构、功能、演化的角度研究各学科（从物理系统、化学系统、生物系统到经济系统和社会系统）的共性规律，是各门学科的方法论和基础。

当今科学技术的发展的特征和趋势之一，是不仅继续向微观深入，而且直接走向宏观系统，走向复杂和综合。过去的几百年，科学研究的深入和分化是主流方向。今后，学科本身的进一步分化和向微观深入虽仍重要，但向宏观、交叉和复杂的整体化的趋势发展正逐渐成为主流。系统科学所掀起的系统运动必将会有重大发展，必将改变科学世界的图景，革新传统的科学认识论和方法论，引起科学思维的一场革命。在系统科学体系中，系统科学的基础科学（钱学森称之为系统学）一直没有真正建立起来，因此系统科学给人以基础不甚牢靠的感觉。随着系统科学的深入，探索系统科学的基础问题将必然提到议事日程。复杂性科学正是传统系统运动的延续，标志着这场系统运动的深入。可以这么说，从1990年代开始，科学界又掀起了一场"复杂性运动"。为什么复杂性运动近年才开始呢？大致又有两方面的原因，一是从各门学科来说，以前还都是"富矿区"，没有必要去选取和开采那些难度大的矿产。随着传统学科逐渐变成"贫矿区"，迫切需要寻找开采、选矿的新方法。二是复杂性科学都是涉及一些难度大的工程，传统的手段是没有办法应对的，只有计算机时代到来才能做到。

我们该把复杂性科学放在现代科学技术体系中的什么位置上呢？是不是在钱学森当代科学技术体系中又出现了一门新的科学技术部门呢？我们认为没有，应把当前的复杂性科学纳入系统科学的体系中，把它定位在系统科学的基础层次中，是系统科学基础，即系统学的重要构件，是系统运动研

究的深入展开。有些人认为,复杂性科学掀起了一场整体化运动,是一门全新的学科,其实系统科学早就开启了这场运动,只不过是复杂性运动的哲学世界观、认识论和方法论的色彩比当初系统运动更浓烈一些罢了。毕竟,复杂性已经成为对系统科学基础层次的不可或缺的探索。

复杂性科学的体系显得异常庞杂。由于它的强烈的世界观、认识论和方法论色彩,在自己的基础理论尚未成熟的情况下,就被急匆匆地借用到上至哲学下至各门科学和技术等领域,匆忙地担当起一般方法论角色,于是便又形成了复杂性的各门应用分支。因而,复杂性科学也形成了一个体系结构。这样,复杂性科学是以复杂性观念、复杂性思维为特征的,具有家族相似性的一群学科。在这群学科中,处于基础层次的是由复杂性基本概念、理论、规律构成的复杂性理论,我们可以将它称为"复杂学",上溯是复杂性的哲学基础,包括复杂性的本体论、认识论和方法论,我们可以称之为"复杂性哲学",往下是用复杂性的理念,对各门传统学科或新学科进行"二次开采和利用",由此得到一些传统的分析还原方法得不到的结论。这类应用十分广泛,在几乎所有的传统学科中都有应用。由此,每个科学都出现了自己的复杂性问题,比如计算复杂性、热力学深度、语法复杂性、文本复杂性等等。按照钱学森的学科体系结构观点,每一门类的学科都具有"三个层次一座桥梁"的结构。目前,复杂性科学已经不是某个学科层次的现象,而是从工程技术到技术科学,到基础科学,再到科学通向哲学的桥梁,四个层次都有大量工作,初步形成了繁荣局面,代表当代科学一种全局性的"复杂性运动"的新动向。正如苗东升所说,复杂性并不是一门新科学,"因为复杂性科学的成果不是在相对论、分子生物学之外又出现的另一门新学科,而是所有学科领域都有自己的复杂性,都需要超越还原论,不可能把这些成果归属于某一门学科,复杂性科学改变的不是个别学科领域,而是几乎所有学科领域,所有学科领域复杂性科学的总和才是所谓'复杂性科学'。这样说还不够,复杂性探索将开辟大量跨学科研究的新领域,它们无法划归某个现有的学科领域,也不会形成单一的学科。"(苗东升,2001:7)我们平常所说的复杂性是试图跨层次、跨语境地概括出一个一般意义上的复杂性的概念,其实这基本上是不可能的。这可以从两方面来理解。一方面,从上面的复杂性科学体系中我们看出,复杂性这个概念是语境依赖的。我们只有在指定的语境下,才能谈论或测度复杂性。因为复杂和简单都是事物的一种属性,只有相对的意义。当我们要测度一个事物是否复杂时,我们一定要有确定的语境,这就像物理学中的速度,只有在确定参照系下才有意义。在不同的语境下,我们就会有不同的复杂性语义和测度。另一方面,抽象概念的语义纷争并不

是复杂性所独有，如果我们问哲学家什么是哲学，问文学家什么是文学等等，其实他们的回答也一样五花八门。正如郝柏林（1999:5）院士所说："不存在复杂性的绝对尺度，不界定基本框架，根本不能就复杂性问题对话，更休提进行科学分析。"

从科学技术层次来说，复杂性科学就是从复杂性的理念出发，探索事物复杂性的基本规律及其应用，复杂性科学将为众多领域的研究和发展提供新思路、新途径、新方法和新应用。具体说来，应该包括以下内容（郝柏林，1999:6）：

(1)研究复杂性科学理论与复杂性的共同特征、转变方式及其各种机制。

(2)研究复杂性表现形式与内在规律及其联系：分岔、混沌、湍流、时空样图与相干结构及其演化规律，各种不可预测的现象的"涌现"和转化规律。

(3)需要发展和突破复杂性科学的研究方法、手段和实验装置。

(4)研究驾御复杂性的方法和技术，例如混沌控制和反控制、混沌同步理论与方法。

(5)研究复杂性在众多领域中的应用。例如，在物理、生物、医学、工程、社会经济与金融、信息技术（保密通讯）、能源（核能）、石油化工、地球物理、凝聚态物质、材料、计算机、宇航等高科技领域的应用。

我们认为，在被称为"复杂性科学"的群体中，大体包括如下若干理论：如现代系统科学中包括耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、复杂巨系统理论；非线性科学中的混沌理论、分形理论等；以及通过计算机仿真研究而提出的进化编程、遗传算法、人工生命、元胞自动机。这可以被视为复杂性科学的内核。目前来看，复杂性的概念和思想已经开始运用于物理科学、生命科学和经济科学各个领域，甚至在人文社会科学的其他领域也多少有些应用。这些应用可以被视为复杂性科学的研究外围（吴彤，2003:8-9）。针对量子力学，盖尔曼（1997:6）曾说："量子力学本身并不是一种理论，它只是一个框架，现代所有的物理理论都必须与它符合"。复杂性也是如此，它并不是一种理论，而是一个框架，一种世界观、认识论和方法论，用库恩的话来说，是一种范式。人们的认识从简单性到复杂性是一种认识范式的更替。复杂性科学范式正在自然科学各学科领域以及人文、社会科学各领域兴起，逐渐形成为与还原论范式不同的复杂性范式（吴彤，2001:20-24）。

三、复杂性科学的科学范式

按照库恩的范式理论,所谓范式,就是将科学共同体凝聚起来的精神支柱和共同信仰,是科学共同体在科学活动中所采纳的一种总的观点或框架,以及共同信念和心理素质。它决定科学家看到什么,提出什么问题和以什么方式思索解决问题。所以,在不同范式指导下的科学理论会提出根本不同的问题,作出极为不同的解释。具体说来,库恩所使用的范式大致可分为三类:①形而上学范式,如一组信念、有效的形而上学思辨、标准、看法、统率知觉的条理化规则等;②社会学范式,如公认的科学成就、具体科学成就、一套科学习惯,或比作一套政治制度、司法裁决等;③人造范式,如教科书或经典著作、工具仪器、类比、格式塔图像等。

到目前为止,复杂性的统一范式还没有真正形成,或者说处于正在形成之中。虽然目前还没有统一的说法,但大体也应该包括库恩所说的三个层次的含义。从哲学层次来说,主要表现为对还原论的超越,走向整体、关联的复杂性观念。法国哲学家埃德加·莫兰(2001:268-270)把彼此联系起来并能决定关于(物理、生物、人类—社会)世界的复杂的观念所形成的理解原则的总体,称为"复杂性范式"。莫兰(2001:268-270)指出,经典科学认为,现象世界的复杂性能够也应该从简单的原理和普遍的规律出发加以消解,复杂性是现实的表面现象,而简单性构成它的本质,并因此形成了"简单性范式"。经典科学的思维方式是建立在"有序"、"分割"和"理性"三大支柱上,集中表现为普遍性原则、可还原原则和可分离原则等这三个原则。然而,随着现代科学的进一步发展,简单性范式逐渐被动摇,正面临着"复杂性范式"的挑战,也就是说,科学范式现在正发生着从简单性范式向复杂性范式的转换。莫兰把复杂性范式归结出 13 条认识"原则",并与简单性范式做对比(见表 2.2,表中 13 条原则被简化为 11 条)。

表 2.2 简单性范式与复杂性范式的内涵对比

类别	序号	简单性范式	复杂性范式
主客关系原则	1	客体性原则 ——对象和知觉/认识它的主体之间的绝对分离原则;不同的观察者/实验者所进行的验证不仅足以表明客观性,而且足以消除认识的主体;在科学认识中尽量消除任何有关主体的问题。	主客体统一原则 ——把观察者/认识者与被观察者/被认识者之间相关联;把观察或实验的机构,把观察者/认识者引入任何物理的观察或实验的领域的原则;把处于文化、社会、历史上的一定时空的人类主体引入任何人类学或社会学的研究范围中的必要性;探索关于主体的科学理论的可能性和必要性。
	2	对象环境相分离原则 ——使对象孤立/脱离于它的环境。	对象环境一体化原则 ——区分对象与其环境,但却不分离,充分认识任何物理组织要求认识它和其环境的相互作用;认识任何生物要求认识它们和其生态系统的相互作用。
	3	摒弃目的性原则 ——认为目的论是非科学的,自主性是不可理解的。	兼容目的论原则 ——从自我产生和自我组织的理论出发,科学地重新确认目的论及自主概念的合理性。
客体原则	4	普遍性原则 ——科学的目的就是为了追求普遍性,而局部性或特殊性作为偶然因素必须被排除。	统一性与多样性共存原则 ——普遍性原则是有效的但又是不够的,应增补局部性、特殊性和不可分离的理解原则。
	5	决定论原则 ——有序性是作为绝对的解释的最高原则,这意味着普遍的和完美的决定论的统治。随机性只是由于我们的无知而产生的表面现象。	非决定论原则 ——不仅融入随机事件,而且也融入组织的问题来寻求对现实的理解。
	6	线性因果性原则 ——处于对象之上和之外的线性因果性的原则。	非线性因果性原则 ——包含相互关联的因果性、相互反馈、滞后、干扰、协同作用、偏转、重新定向,以及自组织现象中的内外因果性原则。

续表

类别	序号	简单性范式	复杂性范式
	7	时间可逆性原则 ——消除时间上的不可逆性；更广义地说，就是消除所有事件性和历史性的东西。	时间不可逆性原则 ——承认和融入时间的不可逆性的原则，使历史和时间参与到任何说明和解释中去的不可回避的必然性。
	8	构成性原则 ——把对事物的认识化归为对这些事物固有的有序性（规律、不变性、稳定性等）的认识。	生成性（过程性）原则 ——重视事物规律、结构等有序性的过程性，强调事物的生成性，许多自组织的问题是不可避免的。
逻辑方法原则	9	还原论原则 ——把对总体或系统的认识还原为对组成它们简单部分或基本单元的认识。	涌现性原则 ——认识到把物理世界中简单的基本单元加以孤立是不可能的；把对元素或部分的认识与对它们组成的总体或系统的认识连接起来是必要的。
	10	形式化和数量化原则 ——通过量化和形式化消除具体的存在物和存在活动。	有限形式化和有限数量化原则 ——从自我产生和自我组织的理论出发，在物理学中和生物学中（更不用说在人类学中）引进和确认存在物和存在活动的范畴是可能的，并需要探索非形式化和非数量化等新的科学原则。
	11	单值逻辑原则 ——形式逻辑作为理论的内在真理标准是绝对可靠的；任何矛盾的出现都必然地意味着存在错误。 ——人们进行思想是把清晰和明确的概念在单值逻辑的推理中加以连接，拒斥逻辑矛盾。	两重性或多值逻辑原则 ——指出形式逻辑学的限度问题，强调复杂的推理原则包含着同时互补、竞争和对立等概念的联合；承认在复杂的形式系统内部逻辑证明的极限，把观察/实验所遇到的矛盾或逻辑困境看作现实的一个前所未知的或更深奥的领域的可能象征。 ——应以两重性逻辑的方式通过宏大概念进行思考，以互补的方式把可能是对立的概念连接起来。

莫尔科尔（Göktuğ Morçöl，2001：104-119）则从更广阔的视野，即把复杂

性科学与实证科学(牛顿经典科学)和后现代主义/后结构主义做对比,来认识复杂性科学的基本性质:

表 2.3 经典科学、复杂性科学与后现代主义特征比较

层面	牛顿的/实证的科学	复杂性科学	后现代主义/后结构主义
本体论	实在的存在论 决定论 离散的实体和事件 线性因果 普遍规律 总体可预测	实在的本体论 决定论和非决定论共存 作为涌现的本体 非线性关系 有限的普遍性或复杂性的规律 有限的可预测性 简单与复杂变得模糊 相变 自组织 协同进化	名义的本体论和实在论 本体的消解
认识论	实证主义认识论 主客体相分 客观知识 真理符合论 事实-价值相分 普遍的法则 工具主义	后实证主义的认识论 主客体相分 知识的内生(语境)本性 工具主义	主客体区分的消解 失去客观的本体或知识 知识是一种语言游戏 没有任何知识具有认识论特权
方法论	还原论、分析模型 演绎主义 定量优先	整体方法(仿真) 利用某些分析和演绎方法 定性和定量的方法	解构

从上面的对照表中我们可以瞥见复杂性科学研究的基本特征:①复杂性科学依然坚持实在论的本体论,认为决定论和非决定论共同存在;②认识论上,复杂性科学属于后实证主义的认识论,认为主客体不能完全分离,知识是语境依赖的;③从方法论上来说,复杂性科学坚持整体论与还原论的相容,认为应将分析和综合相结合,定性和定量相结合。在莫尔科尔看来,复杂性的科学范式既要保持一些必要的科学传统,又必须以后现代的批判性取得自身的地位和特色。

邓特(Dent,1999:5-19)则站在世界观的角度,从本体论、认识论和方法论的层面对传统世界观和正在涌现的世界观进行了深入的比较(见表2.4)。

表 2.4 复杂性世界观与传统的世界观的比较

正在突现的世界观	传统的世界观
整体论 Holism	还原论 Reduclionism
互为因果关系	线性因果关系
视野的实体 Perspectival reality	客观的实体 Objecive reality
观察中的观察者	观察外的观察者
非决定论 Indeterminism	决定论 Determinism
同样集中于外部和内部	主要集中于外部
适应性自组织 Adaptive self-organization	适者生存
集中于实体的相互关系上	集中于离散的实体上
对话似的研究方法	独白似的研究方法
非线性相互关联—各种临界阈限	线性相互关联—各种边际增长
对立两极思考	不是……就是的一极思考
集中于反馈	集中于指令
量子力学视野	牛顿物理学视野
——通过迭代的非线性反馈发生影响	——通过一个到一个的直接力量发生影响
——世界是新奇的和或然的	——认为世界是可预言的
反分化 Dedifferentiation	分化 Diffrentiation
集中于层次内某层次	集中于层次之间
理解/感受性/分析/说明	预言
平等性	父权制
阴阳均衡	阳性支配
语言作为行动	语言作为陈述
似非而是(Paradox)	逻辑
建基于生物学——结构/模式/自组织/生命周期	建基于 19 世纪物理学——平衡/稳定性/确定性动力学
集中于模式 Focus on patterns	集中于速度 Focus on pace(Bailey,1996)
集中于变化 Focus on variation	集中于平均数 Focus on averages
局部控制 Local control	全局控制 Global control
行为自下而上涌现	行为自上而下指定
形态形成的隐喻	装配的隐喻
集中于正在进行的行为	集中于成效或结果
多面手	专家
不可逆时间	可逆时间
心智创造物质	物质创造心智

从邓特的比较表中我们可以看出，我们对世界的理解正由客观的、完全可预言的、决定论的、装配式的世界向涌现的、非决定论的、自主性的世界转变；我们对世界的应对也正由局限于层次内的、自上而下的几种控制式的指令拓展到层次间的自下而上的、非中心—多中心的自组织；科学逻辑将由“不是—就是”的单极性思考向能包容矛盾的多极性、非线性思维转变；语言已不仅只是陈述的工具，而是更像我们存在的家园；基于父权制的现代主义自然观正向基于女性主义、行为自决论、东方主义的自然观转向。

我们的时代正由现代主义转向后现代主义，而当代科学观正经历着一个从本体论、认识论和方法论的全方位的转变，世界的图景开始涌现出越来越多的复杂性，传统理性的、独断式的范式开始衰微，取而代之的是正在兴起的复杂性的科学范式。从哲学上来说，复杂性范式的特征就是它对还原论的反动，还复杂世界以本来的复杂面目，把复杂的事物当作复杂性来处理。

第三节　复杂性科学的历史嬗变

复杂性科学如今已是国际上的热门研究课题，但复杂性科学从何而来？复杂性范式是如何演变形成的？哪些人物对复杂性科学的兴起起过关键的作用？复杂性科学究竟走过了一个怎样的历程？经典科学家终极追求的是简单性，但对生物进化等生命现象无能为力，这却成了复杂性范式的生长点。通过贝塔朗菲、普里高津和霍兰为代表的一大批科学家的数十年的努力，复杂性范式终于初步确立，形成了当今蔚为壮观的复杂性科学的热点。

一、简单：分析科学家的终极追求

从古希腊的先哲们开始，简单性就一直是一个古老朴素的观念和信条，是科学追求的最高目标，无论是从本体论和认识论意义都占绝对的统治地位（魏宏森，2003：7-8）。这种信念以世界统一、和谐的思想形式，以直观、猜测、朴素的表达方式反映了当时人们对自然界中客观存在的简单性的认识。他们试图把自然现象的复杂性认识归结到寻求一种本源，如泰勒斯的水，赫拉克里特的火，德谟克里特的原子与空虚，亚里士多德的四因说等等，简单

性是人们追求的世界本原。正如普里高津所说，相信现实世界的简单性，是从德谟克里特以来在西方科学中形成的基本信念。牛顿在《自然哲学的数学原理》中声称，自然界喜欢简单化，而不爱用什么多余的原因来夸耀自己。他把简单性作为科学信条，置于众法则之首，试图从牛顿三大定律出发演绎出自然界的一切运动规律，他所构造的体系的确也是相当简单的。正是这种简单性才产生出牛顿和拉普拉斯的"万能的上帝"。爱因斯坦则把简单性作为原理来代替上帝，提出了一切自然规律的内在一致性和逻辑简单性原理。在认识论上，文艺复兴时期奥卡姆提出了认识逻辑论证的简单性原理："如无必要，勿增实体"。由此逐步剃掉繁琐的思辨和多余的假设，人们将之称为"奥卡姆剃刀"。

爱因斯坦推崇简单性，认为它是一切科学的伟大目标，即要以尽可能少的假设或公理出发，通过逻辑的演绎，概括尽可能多的经验事实；指出所谓的简单性，是指该体系所包含的彼此独立假设或公理最少。正是由于他把这种简单性当作客观世界的现实接受下来，因而把追求简单性作为他一生追求的最高目标，并不惜花费后半生的全部精力去研究统一场论，试图把万有引力与电磁相互作用通过几何化方法把它们统一起来。

可以说，世界的简单性信念是近代科学研究的重要传统和发展动力之一。在这数百年的时间里，人们一直把简单性思想作为主导思想，努力探究的是物质构成的简单性、运动规律的简单性和科学方法的简单性，并且在实践中取得了惊人的成就。20 世纪的诺贝尔奖得主，绝大多数就是在这一主导思想下获得科学发现的。这个简单性原则至今仍指导科学家们的科学实践，并且每每富有成效，因此，我们不能简单地否定这条原则。但是，我们也应该认识到，追求简单性是一种还原论的思维方法，只能是人类认识的一个阶段。赞美简单性这个孤岛的人们往往忘记了还有复杂性的海洋，于是大自然原则上被看成一个巨大的确定论的保守系统。如物理学家对简单定律的信奉，完全忽略了起始条件和约束条件的复杂性，因而造成了机械决定论的可以彻底计算的幻想模型。随着人类认识水平的提高，科学的迅速发展，简单性观念和方法受到了不断的冲击。简单性虽然仍是我们应追求的目标，但已不是唯一的目标，它仅仅是复杂性海洋中的一个个孤岛而已（吴彤：2000，6-10）。

二、生命：简单性范式的有力挑战

最早对简单性提出挑战的是来自宇宙演化和生物领域。按照热力学第二定律，整个宇宙将越来越走向无序，据此得出了著名的热寂说。然而，这

显然与宇宙的生成演化的实际情况不一致,也与我们的生机勃勃的现实世界相矛盾。达尔文的生物进化论更是揭示出我们的生物世界是从简单生物逐渐演化,通过竞争和选择,走向了一个更加有序更加高级更加丰富多样的生物世界。这样,物理世界的定律和生物世界的规律显然与现实是相矛盾的。于是,人们就认为,物理世界与生物世界是两个世界,服从完全不同的规律,但这样就与简单性的理想相矛盾。按照简单性的理想,这整个世界,无论是物理世界还是生物世界,均应遵从同样的规律,而且这些规律应该是简单的,比如牛顿所构造的运动三大定律和万有引力定律等。

从微观层次来说,由于近代科学不能很好解释生命世界中的秩序和目的性及精神等问题,因此近代生物学中一直存在着活力论和还原论之争。活力论认为生命体中存在一种有目的、超物质、神秘的"活力",被称为"隐德来希",它支配生物体内的物理、化学过程和整个生命过程。20 世纪初,活力论的代表杜里舒(Driesch)做了著名的海胆实验,证明一个海胆胚胎被一分为二以后,它们能顺利地发育成两个正常的海胆。据此,他认为这种异因同果律是无法用任何自然科学定律来解释的,所以生命现象只能用活力因素来解释。还原论则认为,生命体也可以通过还原分析,逐步通过部分来分析整体,一切生命现象和心理现象最终都可以还原为物理、化学现象,因而原则上完全可以用物理、化学规律来说明生物规律。活力论和还原论的长期争论促使许多生物学家(包括贝塔朗菲)从新的视角对生物有机体进行综合研究,并取得了一批丰硕成果。人们终于搞清了:

(1)生物有机体是一个具有复杂结构的、不可分割的整体。生物有机体的整体属性并不等于它各组成部分的属性之和。这就是说,那种企图把生命现象、心理现象还原为物理、化学现象的机械论方法在理论上是站不住脚的。这实际上为复杂性的核心——整体性原理或非还原论奠定了基础。

(2)生物有机体是一个开放系统,它可以通过内部的调节机制和环境进行物质、能量和信息的交换来保持自身的温度、新陈代谢的速度、氢离子浓度、盐浓度的动态平衡。这样,当生物有机体在受到外界干扰时或从不同的初始条件出发,它都能够按照自己的"预定目标"继续生长下去。这就是所谓的等结局性。这一结论不仅完满地解释了杜里舒的实验,有力地否定了活力论,而且也为有关开放系统的理论开辟了道路。

(3)有机体是一个具有严格等级层次的系统,每一层次作为一个整体都有其特定的属性,这些不同的属性把一层次的系统与另一层次的系统区分开来。低层系统相互作用导致构成高层系统,高层系统又构成更高层系统,最后形成一种中国套箱式的等级系统。显然,这是复杂系统层次理论的最

初表达形式。分子生物学虽然将生命现象深入到了分子、原子、原子核甚至更加微观的层次,但依然无法真正理解生机勃勃的生命现象。

20 世纪初物理学的发展也充分暴露了分析还原方法的局限性,并有力地推动了系统思想的出现。19 世纪人们还认为原子是宇宙的最简单构件,所以要研究物质的性质,相信只要把它分割到原子就能彻底搞清楚。但现在已经证明,原子本身具有很复杂的结构,它也是一个系统。量子力学的诞生使人们彻底认识到,试图通过分析单个粒子的性质来了解多粒子系统的性质是行不通的,因为存在于粒子系统中的某粒子所显示的特性和它单独存在时所显示的特性大不相同,就好像单独存在的手不具备附属于人体的手的功能一样。这就意味着,研究两个以上的粒子组成的多粒子系统就必须用整体的方法,把它们作为一个系统来处理。此外,海森堡的测不准关系原理的建立最终敲响了拉普拉斯机械决定论的丧钟。既然人们不可能同时获得微观粒子的位置和动量的精确值,那么拉普拉斯妖怪也就不复存在,这样,以这种机械决定论为出发点的分析方法在微观物理学领域内的地盘也就丧失殆尽。这至少从反面为系统思想的建立提供了一个佐证。

同样,在医学上,我们的医生和心理学家,原来也是常常以简单性思维进行诊断,然而医学中的局部的、孤立的和"线性"的治疗方法,可能会引起负面的协同效应,更不必说疾病不仅涉及个体机体,也同样涉及它存在的社区的生活方式。我们必须学会把人看作复杂的精神和肉体的非线性,才能避免线性思维可能做出的不正确的诊断。20 世纪初兴起的格式塔心理学正是对传统还原论思维的反叛。

此外,在诸如经济学、历史学等其他许多学科领域内,分析方法也碰到了严重的困难,因而越来越受到人们的冷落;而用整体的观点看世界已成了一种不可阻挡的潮流,这股潮流最终把复杂性思想推上了科学舞台。泰勒关于工厂管理的新思想,兰彻斯特的作战问题研究,怀特海的过程哲学,格式塔心理学等等,正是这个时候发展起来的。

三、系统:"老三论"对复杂性科学的美好设想

圣菲研究所(SFI)第一任所长考温认为,复杂性科学作为一门科学,以及对复杂性的现代兴趣的唤醒,肇始于贝塔朗菲 1928 年的工作。也就是说,贝塔朗菲创立的一般系统论标志着复杂性科学的诞生,其标志可以从两方面来说明。首先,从一般系统论开始,"系统"、"整体"和"整体性"成为科学研究的对象,可是在不久以前它们还被看作是超越科学界线的形而上学概念。贝塔朗菲(1987:2)说:"我们被迫在一切知识领域中运用'整体'或'系

统'概念来处理复杂性问题。这就意味着科学思维基本方向的转变。"其次，一般系统论是第一个反对还原论的科学理论，其方法论是非还原论的。他之所以反对还原论，是因为他认为传统的还原论科学仅能认识系统的各组成部分，而不适用于研究系统的"关系"，"为了理解组织的完整性，应当既认识各组成部分，也认识它们之间的关系"（贝塔郎菲，1987：310）。

早在20世纪20年代，奥地利生物学家贝塔朗菲在研究生物学时就提出了"机体系统理论"的概念。1928年他出版了《现代发展理论》，紧接着1932年又出版了《理论生物学》，书中强调了在研究生物有机体时应注意到它们的整体性、动态结构、能动性、组织层次和开放性，即必须把生物有机体作为一个整体来对待。几乎在同时，心理学家柯勒、考夫卡提出了"格式塔"概念，强调必须用整体的观点研究各种心理现象；生物学家韦斯也独立提出了他自己的整体主义思想。1937年，贝塔朗菲在美国芝加哥大学的一次哲学研讨会上首次提出了一般系统论的基本原理，把他的有机体生物学的有关理论推广到生物学以外的其他学科领域。然而遗憾的是，由于第二次世界大战的爆发，人们的注意力不得不从科学方面过多地转移到了战争上，因而贝塔朗菲的观点并没有引起学术界应有的重视。相反，他的观点却遭到了一部分人的非议。有人认为他的科学同形性思想并不比数学上的 2 + 2 = 4 高明多少，还有人甚至认为他的整体论思想会极大地妨碍在许多科学领域都业已取得巨大成功的分析研究方法。贝塔朗菲并没有气馁，他仍然信心十足地在1945年《德国哲学周刊》第18期上又发表了《关于一般系统论》这一标志着一般系统论诞生的具有划时代意义的论文。在这篇论文中，他阐述了创立一般系统论的目的、意义和基础，提出了一般系统论的基本思想，并着重研究了等结局性、科学同形性、非加和性等重要概念。尽管这篇重要论文在当时的战争环境里并没有多少人知晓，但战争结束后不久，由于控制论、信息论、博弈论、决策论、网络理论、现代组织论等相关学科的陆续诞生，人们很快认识到了一般系统论的重要性，因而迅速得到了广泛认同。

20世纪40年代，一般系统论、信息论、控制论、运筹学、系统工程等先后问世，他们原本都是为解决以往科学技术难以解决的复杂性问题而提出来的。这场系统运动提出探索复杂性的科学任务，提供了今天复杂性科学必需的若干概念（系统、信息、反馈、组织、自组织等）和方法论思想（对还原论的质疑和超越）。可以说，这个时期的复杂性科学就是系统研究，主要代表人物除贝塔朗菲外，维纳是另一个重要人物，虽然控制论的创立并未明确提出研究复杂性问题，但由于维纳注意的中心是对机器（人工世界）、动物和社会的统一描绘，后两者属于典型的复杂巨系统，与其后出现的以工程系统为

对象的工程控制论、现代控制理论显著不同。

这个时期必须提及的人物还有韦弗尔，他把科学对象分为三类：简单性、无组织的复杂性和有组织的复杂性，对它们的研究导致分别产生了19世纪的科学、20世纪上半期的科学，以及未来50年将要产生的科学。他还讨论了科学的限度、利用计算机模拟进行复杂性研究等，这些都是当前复杂性科学的重要问题（Weaver，1948：536-544）。这篇纲领性文章表明复杂性与信息、复杂性科学与信息研究之间的内在联系，以及关于复杂性的科学与社会信息化的内在联系。

另一位重要人物是冯·诺伊曼。这位极善于对问题作形式化表述和求解的科学家，20世纪40年代以后的主要兴趣转向复杂性问题。在提出计算机原理的过程中，通过对"电脑"和人脑的比较认识了思维的复杂性；通过研究机器能否像生物那样具有自复制能力，了解了生命现象的复杂性；通过把博弈论应用于经济问题而了解了社会的复杂性。诺伊曼据此得出结论说："阐明复杂性和复杂化概念应当是20世纪科学的任务，就像19世纪的熵和能量概念一样。"（郝柏林，1999：3-8）韦弗尔和诺伊曼的预见未能在20世纪实现，但他们的超前眼光极大地启迪了后继者。诺伊曼创造的元胞自动机模型则成为当前复杂性科学常用的锐利武器。

以贝塔朗菲为代表的第一代的复杂性科学的探索者们虽然都雄心勃勃，人人都构造了自己的反对简单性、探索复杂性的研究纲领，但后来的学科发展和实践证明，他们似乎过于乐观。其实他们并没有完全跳出还原论的窠臼，往往是自己用还原论的手段去追求复杂性的目标。他们的主要目的和方法依然是找出不同物质层次的同型性，从静态的角度研究系统的结构、功能和性态，力争给出定量的精确数学表达。他们还没有研究系统如何演化，系统如何从无序到有序等问题。因此，仍然是研究已存在的理论，这些理论构成了复杂性发展历史第一个阶段的代表性成果。

四、演化："新三论"对复杂性科学的重要贡献

经过第一代复杂性工作者的努力探索，复杂性范式逐渐浮出了水面，但事实证明贝塔朗菲们的美好设想并没有那么容易实现，因此，后来停步不前。首先打破沉寂的是比利时物理学家普里高津，他于20世纪70年代创立了耗散结构理论。随后，哈肯的协同学、艾根的超循环论、托姆的突变论等相继创立，形成了一股系统演化的运动，并形成了所谓的自组织理论。其中普里高津和艾根还因此获得诺贝尔奖。这些非线性理论强调不稳定、不可逆、自组织和复杂性，使还原论的简单性观念再一次受到巨大的冲击。20世

纪80年代出现的混沌理论、分形理论以及梅开二度的元胞自动机理论，再次形成更加强烈的冲击波，使得经典的简单性观念遭受重创。

在这一阶段，复杂性科学研究系统的演化，研究系统从无序到有序，或从一种有序结构到另一种有序结构的演变过程，所用的研究方法也不是还原分解，而是物理实验或模型、数学模型、计算机模拟等，因此其方法论是非还原论的。在研究演化方面，还原分解方法的作用十分有限，因为还原分解方法主要用于研究物质的组成结构。研究演化的主要方法是整体研究方法，即在保持系统整体完整的情况下，利用模型、模拟等手段来研究系统的整体演化行为。

这些复杂性科学理论之间存在着密切的联系。我们认为，耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、混沌理论和分形理论都是自组织理论，它们分别研究自组织现象的不同方面。吴彤(2001:20)认为："耗散结构理论是解决自组织出现的条件环境问题的，协同学基本上是解决自组织的动力学问题的，突变论则从数学抽象的角度研究了自组织的途径问题，超循环论解决了自组织的结合形式问题，至于分形和混沌理论，我认为它们是从时序与空间序的角度研究了自组织的复杂性和图景问题。"

耗散结构理论是普里高津于二十世纪六、七十年代创立的，来源于物理、化学的研究。其赖以建立的几个典型的实验是：贝纳德流体实验、激光和化学震荡反应。这些实验现象和生物体有相同的特征，即有序结构的形成和维持需要耗散能量和物质，因此，普里高津把这类结构称为耗散结构，而耗散结构理论就是研究耗散结构的形成、稳定、演化及其他性质。普里高津认为形成耗散结构的条件是：系统必须开放、远离平衡态、非线性相互作用和涨落现象。以普利高津为首的布鲁塞尔学派通过远离平衡态研究，提出耗散结构论，为世界各地复杂性科学研究提供了共同的理论武器，并分析界定复杂性概念，较早论证了复杂性科学的概念和提出"探索复杂性"的响亮口号，其努力虽不一定成功，但属于开拓性工作。此外，他还提出复杂性有不同等级的思想，特别考察了"最低复杂性"，提出放弃世界简单性的信念，以便锻造复杂性科学的方法论，还提出了关于复杂性的哲学思考，如复杂性的客观性、简单性与复杂性的辩证关系等。正像苗东升(2001:5)所说："在有关复杂性科学的哲学观点、科学思想、方法论等方面，普利高津学派的影响深远，至今无出其右者。"

协同学是由德国学者哈肯创立的，它的产生和形成时间基本上与耗散结构理论相同。协同学研究有序结构形成和演化的机制，描述各类非平衡相变的条件和规律。协同学从物理和化学系统出发，研究贝纳德流体和激

光等非平衡相变,阐述系统中子系统如何协同作用形成有序结构。哈肯学派就简单巨系统问题很好地论证了客观世界的复杂性是通过自组织从简单性中逐步演化出来的,自组织是刻划复杂性的科学概念。如哈肯(2000:5)所说,协同学是目前"最先进的自组织理论",苗东升认为这一点大概未来十年还不至于改变。协同学解决问题基于数学模型,主要是常微分方程。只要能有效确定序参量,且个数很少(一个或几个),能够建立序参量方程,系统的自组织即可用数学方法精确刻划,与硬科学无二致,在这一点上远胜于普利高津。但他的方法局限性比较大,如果宏观序参量过多,或无法建立有效的序参量方程,协同学也只能提供定性分析。

超循环理论由德国学者艾根创立于20世纪70年代,是直接建立在生命系统演化行为基础上的自组织理论。在超循环理论出现以前,生命的起源和进化分为两个阶段,即化学进化阶段和生物进化阶段。艾根的研究发现,把这两个阶段直接连接起来是困难的,在这两个阶段之间应该存在着一个分子自组织的进化阶段,在此阶段中完成从生物大分子到原生细胞的进化。艾根的超循环理论是关于分子进化的自组织理论,对生物复杂性有较深入的研究,有助于揭示生命起源的奥秘,是复杂性科学的一项重要工作。但还属于科学假说,影响有限。

此外,托姆的突变论研究了不连续的突变现象,对演化中的突变行为给予抽象的、形式的和定量化的描述和说明。20世纪80—90年代热门的混沌理论,进一步冲击了所谓严格确定性和线性决定论。当气象学家洛伦兹提出"蝴蝶效应"时,人们认识到:即使完全确定性的动力学方程,也仍然会出现类似随机性的不确定演化;混沌不仅可以出现在简单的系统中,而且常常通过简单的规则就能够产生混沌;非线性动力学混沌是系统内在的、固有的、而不是外加的、外生的。

五、涌现:复杂性范式的初步形成

普里高津们虽然各有贡献,但他们是分门别类地进行研究,而没有更多地考虑它们之间的联系,更没有思考建立一个复杂性科学的统一范式。只有到了20世纪80年代,随着美国圣菲研究所的建立,才真正步入复杂性科学的新阶段。1984年5月,在美国的新墨西哥州的州府圣菲建立了一个专门从事复杂性科学研究的机构——圣菲研究所,这个所是在三位诺贝尔奖得主盖尔曼、安德森、阿罗为主的物理学家、经济学家的大力推动下建立起来的,被称为"老帅倒戈",给世界科学界带来了巨大的震动。它由众多来自不同学科的物理学家、生物学家、经济学家等等,为了探索复杂性的共同志

向走到了一起，成了世界复杂性科学的专门机构和前沿阵地。圣菲研究所的特点是对世界各国开放，成员流动，众多世界级的科学家参与，开展规模空前的跨学科、跨文化综合研究，加上强大的硬软件支持，声势夺人，影响巨大，被称为世界复杂性科学研究的中枢。最重要的是他们提出的一些概念和方法，被看作代表着一种新的态度，一种看问题的新角度和一种全新的世界观。他们对复杂性的研究不再是分门别类地进行，而是打破了以前的学科界线，企图建立统一的复杂性科学纲领。因此，圣菲研究所的成立，是复杂性科学进入新阶段的标志，也是复杂性范式初步形成的标志。

按照库恩的范式理论，一个学科的范式形成，大致有内在和外在两个方面的标志。从外在方面来说，应该出现专门的学术机构，形成有一定学术影响的科学共同体，有一定的刊物或连续出版物，并有某些派别脱颖而出，形成共同体的核心；从内在方面来说，科学共同体内形成共同的"学科基质"，即通用语言、共同信念、共有价值和范例。圣菲研究所的建立及其后来的成功运作基本上符合了库恩所说科学共同体和范式形成的标准。

从外在的方面看，在圣菲研究所成立以前，复杂性科学没有一个真正以探索复杂性为共同目标的研究机构。那些探索复杂性的人们分布在不同的学科领域，基本上属于业余爱好，也没有自己的刊物，有关复杂性或系统研究的论文都是偶然地发表在各种其他专业刊物上，例如洛伦兹有关混沌的重要论文就发表在气象杂志里，以至被埋没十余年。宣告混沌研究诞生的李-约克的著名论文《周期三意味着混沌》也是发表在数学杂志里。圣菲研究所的出现结束了这种历史。圣菲研究所成立以来，基本上每年出版复杂性科学的年报这一连续出版物，出版了专门的杂志《复杂性》(*Complexity*)，随后又有 *Advances in Complex system*，*Chaos*，*Complexity International*，*Economics & Complexity*，*Emergence* 等探索复杂性的传统或电子杂志先后创办，有关复杂性的专著更是雨后春笋般出版，形成了一股复杂性的出版热。大名鼎鼎的美国《科学》杂志也推波助澜，1999 年几乎成为关注复杂性科学的专辑，除陆续发表复杂性的文章外，还于四月份出版复杂性专辑《复杂系统》，一次性发表 8 篇复杂性方面的文章，而且还加上编者按，精心组织一批正在主流科学主战场的物理、化学、生物、经济、生态、地理环境、气象、神经科学等前沿工作的著名学者探讨各自领域的复杂性，有力地表明到世纪之交主流科学界对复杂性科学的明确关注和认可，并直接参与进来，这是极富意义的进展。圣菲研究所的影响也越来越大，几乎成了复杂性科学的代名词，形成了以圣菲研究所为依托的复杂性科学的"圣菲学派"。

从内在方面来说，复杂性的专业基质也在逐步形成之中。圣菲研究所

的成立，复杂性、复杂性科学这些名称逐渐得到学界的认同，并且迅速传播和流行开来。介绍圣菲研究所和复杂性科学的一本畅销书《复杂性》更是被迅速翻译成各种语言，畅销全世界（沃尔德罗普，1997）。这样，复杂性的名称、术语、符号也就逐渐开始有了统一化的趋势。圣菲研究所一开始就树立了促进知识统一和消除科学与人文文化之间的对立，全面推进复杂性探索的宗旨。圣菲学派的研究者们虽然有不同的研究方向，但他们的研究对象方法和工具是一致的，即研究对象是复杂系统，研究方法不是还原分解，而是超越还原论，采用隐喻、类比、模型、模拟等方法。这些鲜明特点是以前复杂性探索时所不具备的。圣菲研究所一再旗帜鲜明地声称，他们的研究对象是复杂系统，而以前复杂性科学的对象主要是一般系统。以前的复杂性探索者不太重视计算机的工具作用，而在圣菲研究所，计算机成了主要的研究工具。他们认为，在科学研究中使用计算机所产生的革命，类似于生物学中使用显微镜，天文学中使用望远镜所导致的科学革命，计算机使许多复杂系统第一次成为科学的研究对象。利用计算机来模拟各种现象，是这一阶段复杂性科学研究的显著特征，这方面最有名的例子是圣菲研究所朗顿所从事的人工生命研究。

在过去的科学研究中，总是将主体客体分开，只对客体进行科学研究。以前的复杂性研究者也是落入这样的窠臼。圣菲研究所却特别重视主体的研究，他们把客体和主体联系起来，形成主客体耦合的系统，特别是圣菲研究所的霍兰特别重视对主体的研究。因此，霍兰认为隐喻和类比在未来的复杂适应系统研究中会起关键性的作用，而且他相信丰富的隐喻和类比是创造性科学和诗歌的核心。把隐喻和类比作为科学研究方法是这一时期复杂性科学的独特之处，这在还原论者看来是非科学的，以前的复杂性研究者也没有把它们当作研究方法。

圣菲研究所在复杂性科学研究方面所涉及的主要内容有：复杂适应系统、非线性系统（如元胞自动机）、标度、自相似、复杂性的度量、经济复杂性等等，这些研究都取得了令人瞩目的成就。例如，霍兰对复杂适应系统的研究，连续出版了《隐秩序》（2000）、《涌现》（2001）等专著，提出了代表这一时期的著名观点——涌现论，在国际上产生了巨大的反响。1994 年霍兰就正式提出了复杂适应系统理论，基本理论和思想在《隐秩序——适应性造就复杂性》中得到表达（2000），在《涌现》一书中更加展开和深入（2001）。复杂适应系统理论的基本概念有：聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型、积木。该理论在微观层次上是基于遗传算法，其宏观模型为回声模型。圣菲研究所还开发了实现复杂适应系统理论的软件平台——SWARM。

朗顿对元胞自动机的研究也影响巨大，现在他被称为"人工生命之父"。朗顿人工生命研究不是利用还原分解方法去解剖生物体，而是利用计算机来模拟生命现象，体现了这一阶段复杂性科学的主要特点。此外，帕·巴克通过沙堆模型对自组织临界性的研究，经济学家阿瑟对报酬递增率、路径锁定和不可预测性的研究，也是圣菲研究所的代表性成果，并产生了巨大的影响。

圣菲学派的工作使复杂性科学实现了根本观念的改变，从过去的构成论变成了生成论。苗东升认为，普利高津们要么抽象到哲学，要么具体到理论物理，中间的空白太大。SFI 恰有介于中间的东西，有超过欧洲学派的新思想新方法。CAS 理论代表复杂性科学和系统理论的一个重要方向，对解决一大类复杂系统问题比较有效，关于涌现性的探索很有价值。他们基于计算机的模型也是方法论的重要更新，前者是生成论的，后者是构成论的。SFI 是生成论的，哈肯是构成论的。

以前的复杂性科学队伍主要由物理学、化学、生物学和工程界的人们组成，偶尔有一些哲学家参与。但这次的复杂性形成了一场声势浩大的复杂性运动，除上述人员外，经济学、人类学、文化学等等，似乎一切学科的人员都参与其中了。复杂性科学目前在所有发达国家，以及中国、巴西等欠发达国家成为一种具有世界规模的科学思潮，一种文化运动。复杂性科学已经有大量著作问世，有关文献在加速增长。

从上述各方面的现象来看，复杂性科学共同体和复杂性范式正在初步形成之中。但是，目前的复杂性科学称得上学派林立，观点纷呈，新见迭出，还没有哪一个学派占绝对优势，因此复杂性科学还没有进入库恩所说的常规科学研究，还基本上处于前科学时期，这是必须承认的。

第四节　复杂性科学兴起的语境分析

由上面的分析我们知道，复杂性的范式已经初露端倪，已经形成了一场声势浩大的"复杂性运动"。这场运动看似突然，其实它也有其兴起的复杂背景，也就是说，复杂性科学的孕育和诞生有着极其复杂的背景。对这场复杂性运动进行多视角的语境分析，将有助于我们理解复杂性运动的来龙去

脉,并将这场运动引向深入。

一、复杂性科学兴起的哲学背景

复杂性科学的兴起有其深刻的哲学背景,它是人们对长期流行的机械论反思的结果,是对20世纪40年代以来的系统论运动的深入,是20世纪60年代以来西方猛烈的后现代思潮的影响在科学层面上的回应。

(一)对机械论反思的结果

我们在回顾复杂性范式的发展历程时已经对此做过论述,在此只作简单的叙述。西方的机械还原论有着源远流长的历史,近代科学的产生和发展基本上是在机械论的浸润中,近代科学的目标即追求结果的简单性确定性。从古希腊的先哲们开始,简单性就一直是一个古老朴素的观念和信条,后来成为理念追求的最高目标,无论是本体论和认识论,其意义都占绝对的统治地位。这种信念以世界统一、和谐的思想形式,以直观、猜测、朴素的表达方式反映了当时人们对自然界中客观存在的简单性的认识。他们试图把自然现象的复杂性认识归结到寻求一种本源,如泰勒斯的水,赫拉克里特的火,德谟克里特的原子与空虚,亚里士多德的四因说等等,简单性是人们追求的世界本原(魏宏森,2003,7-8)。

简单性原则至今仍指导着科学家们的科学实践,并且卓有成效。因此,在西方文化中,逐渐形成了机械论的思维模式,并成为思维的唯一模式。然而随着人类认识水平的提高,科学的迅速发展,简单性观念和方法受到了不断的冲击。最早对简单性提出挑战的是来自宇宙演化和生物领域。按照热力学第二定律,整个宇宙将越来越走向无序,据此得出了著名的热寂说。然而,这显然与宇宙的生成演化的实际情况不一致,也与我们的生机勃勃的现实世界相矛盾。达尔文的生物进化论更是揭示出我们的生物世界是从简单生物逐渐演化,通过竞争和选择,走向了一个更加有序、更加高级、更加丰富多样的生物世界。这样,物理世界的定律与生物世界的规律显然与现实是相矛盾的。从微观层次来说,用还原论的方法所构建的分子生物学等虽然将生命现象深入到了分子、原子、原子核甚至更加微观的层次,但依然无法真正理解生机勃勃的生命现象。

20世纪初兴起的格式塔心理学也是传统还原论思维的反叛。泰勒关于工厂管理的新思想,兰彻斯特的作战问题研究,怀特海的过程哲学,格式塔心理学等等,也正是在这个时候发展起来的。此外,在诸如医学、经济学、历史学等其他许多学科领域内,机械论也碰到了严重的困难,因而越来越受到

人们的冷落;而用整体的观点看世界已成了一种不可阻挡的潮流,这股潮流最终把复杂性思想推上了科学舞台。

(二)系统运动的深入和延伸

在对传统科学的分析还原方法的反动中,从20世纪下半叶兴起了一场"系统运动"(朱志昌;见:许国志,2001:538-612)。在这场运动中逐渐形成了40年代的一般系统论、信息论、控制论;70年代的耗散结构论、协同学、突变论;80年代的混沌理论、分形理论等。这些学科群一起形成了钱学森称之为"系统科学"的一个新的科学部门。系统科学把事物看作系统,从系统结构、功能、演化的角度研究各学科(从物理系统、化学系统、生物系统到经济系统和社会系统)的共性规律,是各门学科的方法论和基础。

在系统科学体系中,系统科学的基础科学(钱学森称之为系统学)一直没有真正建立起来。随着系统科学的深入,探索系统科学的基础问题必然将提到议事日程上来。复杂性科学正是传统系统运动的延续,是这场系统运动的深入。从20世纪90年代开始,科学界又掀起了一场"复杂性运动"。这场复杂性运动是系统运动的延续和深入。

(三)后现代思潮在科学层面上的反映

20世纪60年代,一场以"后现代主义"命名的文化运动在大西洋两岸获得日益扩大的声势和声誉,是标榜自己区别于现代思潮的一种思想潮流。复杂性科学与后现代哲学有着一定的关联。从大的历史尺度看,复杂性科学和后现代哲学置身于同一历史变革过程,受同样的时代特征和条件的滋养和制约,理论思考具有相同的动力、课题、思路的资源,而且具有众多共同的思想渊源,因而必定会有内在的联系,会有共同或相近的思想基因(苗东升,2003:29-32)。

从传统哲学到现代西方哲学,各种哲学大都是有中心、有自身逻辑基础和结构的宏大叙事,而后现代主义却正好相反,他们追求的是非中心化、反逻辑性和无结构的东西。从价值取向来说,后现代主义与复杂性科学具有异曲同工之妙。虽然后现代哲学异常庞杂,但基本上分为破坏性和建设性两种后现代思潮。前者的独特词汇主要有:分离(disjunction)、差别(difference)、破碎(fragment)、解构(deconstruction)、混沌(chaos)、偶然(happenstance)、自发(spontaneous)、不确定性(indeterminacy)等;后者的独特词汇有:多样性(multiplicity)、多元化(plurality)、复杂性(complexity)、模糊性(ambiguity)、连通性(connectivity)、关系(relation)、依赖(dependency)、和谐

(harmony)、综合(synthesis)、整合(integration)等(吴彤,2003:8-9)。

此外,被称为“复杂性科学”的学科群体所关心的是传统学科忽视了的东西,它强调多样性、演化、生成和涌现,例如非线性、不确定性、自组织性、无序、多样性、路径依赖、混沌现象、分形几何图形等,这些都与后现代思潮的追求相契合。复杂性科学与后现代主义的差别在于,“复杂性科学主要是从科学技术层面解读时代课题,挑战现代性,进而建构理论框架,设计解决方案;后现代主义则试图从哲学、科学、文化、社会学、文化学甚至宗教的层面解读同一时代课题,全方位地挑战现代性,全方位地揭露现代主义的弊病,全方位地设计替代方案”(苗东升,2003:29—32)。后现代主义在20世纪60年代一登上舞台就显示出极具进攻性和战斗力,到80年代已发展成为一种支配性的知识和文化权力,从而为复杂性科学营造了有利的文化氛围。后现代主义有助于理解复杂性,把握复杂性科学的历史意义。因此建设性后现代主义把普里高津视为同道。即使是破坏性的后现代主义也对复杂性科学有正面的影响。虽然复杂性研究者不承认后现代主义对他们的直接影响,但作为时代精神的反映,后现代的浩大声势,不可能不影响他们的思维。当然,后现代思潮中对于相对主义的推崇和文化虚无主义倾向是复杂性科学所批判的。这也是两者之间的重大差别。

二、复杂性科学兴起的实验事实

科学必须建立在坚实的实验事实的基础上,复杂性科学的兴起也是如此。有大量的实验事实与复杂性科学的兴起有关,例如贝纳德对流、B-Z反应、虫口方程、蝴蝶效应、自组织临界性、元胞自动机、人工生命实验等。

贝纳德对流(Benard Convection)是演示自组织现象的一类重要实验,这方面第一个是由法国的贝纳德于1900年在为其博士论文工作中利用流体完成的。当从下面加热某一流体薄层时,起初在流体中只有热传导存在,当流体中的温度梯度超出某一临界值时,原来静止的流体中会突然出现贝纳德对流。当上表面为自由表面时,形成的对流花样的基本单元呈六角形格子状,而当上表面覆盖有平板时,对流花样的基本单元是两个向相反方向旋转的卷筒,但宏观花样取决于容器的形状。在长方形容器中卷筒平行于长方形的短边,而当容器为圆形时,这些卷筒形成同心环。自第一个实验来,贝纳德对流一直引起人们强烈的兴趣。近年来国内外许多人在不同实验条件下见到了各种各样的对流形式(许国志,1994:14)。

所谓**B-Z反应**是贝洛索夫—扎波廷斯基反应(Belouso-Zhabotinsky reaction)的简称,它是前苏联化学家贝洛索夫和扎波廷斯基所做的产生了自组

织现象的一类化学反应。1958年,贝洛索夫在金属铈离子作催化剂的情况下进行了柠檬酸的溴酸氧化反应。实验发现某些条件下某些组分(例如溴离子、铈离子)浓度会随时间作周期变化,造成反应介质的颜色在黄色和无色之间作周期性的变化。其后扎波廷斯基等人继续并改进了贝洛索夫的实验,发现另外一些有机酸(例如丙二酸)的溴酸氧化反应也能呈现出这种组分浓度和反应介质的颜色随时间周期变化的现象,就像钟摆一样发生规则的时间震荡。因此这类现象一般称之为化学震荡或化学钟。现在发现还有不少反应体系能呈现这种化学震荡,浓度花样和化学波现象。这些现象向人们展示了一种化学系统自发的时间、空间、时一空的复杂结构(许国志,1994:14)。

在20世纪60—70年代,美国数学家约克和他的博士生李天岩共同发现了"周期三蕴含混沌"的(理论)现象。他们通过对下面的一个迭代函数

$$f_{n+1}=rx_n(1-x_n)\quad x\in[0,1]\quad 0<r<4$$

的迭代性质的研究,发现了当出现三周期时则任何周期就都可能出现。

上面的函数很早就在生物界的领域里出现了,它是一个非常重要的模型,通常被称为"Logistic Model",又被称为**虫口方程**,是一个对某虫类的世代演化进行简化研究的抽象模型。关于这个函数的迭代,现在已是举世皆知。但是在20世纪60年代,生物学家们对这个方程的性质并不完全清楚。数学家李天岩和约克通过气象学家洛伦兹的文章(关于大气混沌的研究)发现了在这个迭代方程中的后来被命名为"Li-Yorke定理"的迭代演化规律。当r较小时如果做$x_{n+1}=rx_n(1-x_n)$这样的迭代,对于(随意)取得x_0,$\{x_n\}$这个数列最后都趋于一个点。但是当r慢慢变大,当它超过3时(注意r的数值为3时发生重大转折),$\{x_n\}$这个数列却走向一对周期二的点。当r再变大,而超过某一个数值时,$\{x_n\}$走向一组周期4的点。然后,随r的逐渐变大,$\{x_n\}$最后会趋近一组周期$2m$的点。但是当r大于某个数值后,却会出现一些"奇怪的现象"。例如,对于某些r来说$\{x_n\}$最后走向一组周期5的点,对于某些r来说$\{x_n\}$最后趋近一组周期6的点。对于某些r来说$\{x_n\}$在两个迭代之间跑来跑去。尤其当$r=4$时,$\{x_n\}$这个数列在[0,1]这个区间跑来跑去(詹姆斯·格莱克,1990:10-24)。

1961年气象学家洛伦兹在一台旧计算机对描述天气的简化方程进行模拟仿真,以期实现天气预报的计算机化。有一天,为了考察一条更长的序列,洛伦兹想走一条捷径,于是他没有令整个计算机从头运行,而是从中途开始。作为计算的初值,他直接打入了上一次的输出结果。然而经过一段时间后,他发现了出乎意料的事:从几乎相同的出发点开始,计算机产生的

天气模式差别越来越大,终至毫无相似之处。这就是所谓的蝴蝶效应,初始条件的差之毫厘,导致结果的谬以千里,它播下了混沌理论这门新学科的种子(詹姆斯·格莱克,1990:10-24)。

元胞自动机模型是首先在1950年由冯·诺伊曼(John von Neumann)创造的,1986年起沃弗拉姆(Wolfram)发展将它用于模拟复杂现象。我们知道,物理系统的模拟有多种模型。常微分方程模型,其时间和状态(或函数)都是连续的。映射模型(或差分方程),其时间是离散,状态却是连续的。元胞自动机模型是又一种物理系统的模拟方法,该方法中时间、空间以及状态(函数)值都是离散的。元胞自动机方法的特点是通过空间的局部的动力学演化规则而得到整体(全局)的时空结构。元胞自动机方法首先将空间分成若干空格,然后每个单元元胞的状态用离散量来表示,最后根据物理考虑制订格点上元胞是如何根据周围几个邻居的状态(即局部的)如何演化(随时间)的规则。按照上述步骤演化,到较长时间以后,元胞自动机就会形成各种各样复杂的图案(许国志,1994:569)。

自组织的临界性是1987年由美国布卢克海汶国家实验室的三名物理学家巴克、汤超(Tang. C)和维森费尔德(Wiesenfeld. K)第一次提出来的。它是指一类开放的、动力学的、远离平衡的、由多个单元组成的复杂系统,能通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态,处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似"多米诺效应"的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统,形成一个大的雪崩。临界性的特征为,处于临界态的系统中会出现各种大小的"雪崩"事件,并且"雪崩"的大小(时间尺度和空间尺度)均服从"幂次"分布。自组织临界性的经典模型是沙堆模型(巴克,2001:54)。

人工生命诞生于美国圣菲研究所,但它的智慧种子可以追溯到图灵和冯·诺伊曼。图灵证明生命的胚胎发育可以用计算的方法加以研究。冯·诺伊曼则试图用计算机的方法描述生物自我繁殖的逻辑形式。到了20世纪七、八十年代,随着计算机速度的大幅度提高,以及个人计算机的普及,在康韦、沃弗拉姆等人有关"生命游戏"研究的基础上,朗顿发现,处于"混沌边缘"的元胞自动机既有足够的稳定性存储信息,又有足够的流动性来传递信息。当他把这种规律与生命和智能联系起来,他认识到,生命或者智能很可能起源于"混沌边缘"。于是,一个崭新的思想浮现在朗顿的脑海中:如果我们在计算机或其他媒介中建立起产生"混沌边缘"的一定规则,那么,从这些规则中就可能浮现出生命来。由于这种生命不同于地球上以碳为基础的生命,于是朗顿把它称为"人工生命"(李建会,2002:126-163)。

此外还有许多实验事实,例如,20世纪初数学家康托尔发现的三分集,

60年代芒德勃罗集等几何怪物,物理学中的激光等先后被发现。这些实验事实,在传统的简单性科学看来,都是一些反常甚至是“病态”的事实,因而都无法纳入还原论的科学体系中,但它们却成为建立复杂性科学的基本事实和实验平台。正是这些传统科学看来“反常”的科学事实,导致了复杂性科学新学科的出现。

三、复杂性科学兴起的理论来源

复杂性运动是一场基本思维方式的变革运动,它应该与各门已有科学理论有一定的联系,因此其理论来源应该是多方面的。但是,复杂性科学的主要研究对象是复杂系统的复杂性,它从本质上来说应该是系统运动的一种延续和深入,因此,其理论的直接来源应该来自原来系统科学的各学科,例如一般系统论和各种探索复杂系统为目标的各门新学科,如耗散结构理论等。因此,复杂性科学的第一个来源是现代系统科学的各分支,第二个来源是非线性科学的各学科,第三个来源是现在正热门的人工生命研究的各个活跃领域(见图2.1)。

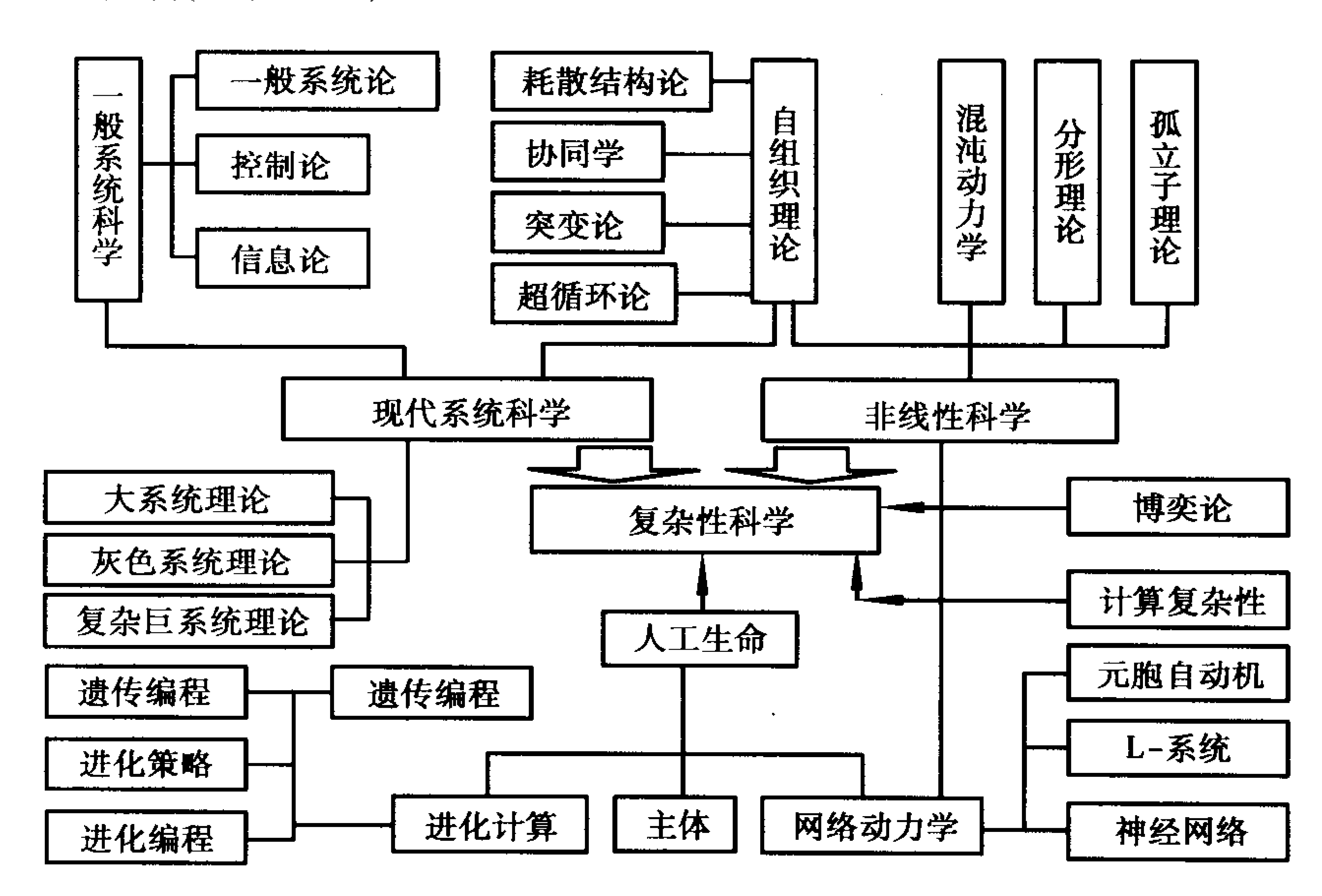


图2.1 复杂性科学的理论构成示意图

(一)系统科学来源

20世纪,由于生产力的巨大发展,出现了许多大型、复杂的工程技术问

题和社会经济问题，他们都以系统的面貌出现，都要求从整体上加以优化解决。由于这种社会需要的巨大推动，第二次世界大战后，雨后春笋般出现了一个“学科群”，簇拥着科学形态的系统思想涌现出地平线，横跨自然科学、社会科学和工程技术，从系统的结构和功能角度研究客观世界的系统科学便应运而生。第一个诞生的是以贝塔朗菲为代表的一般系统论，它真正诞生于 1928 年，只是由于世界大战和思想过分新颖而没有立即被接受，到战后才开花结果。紧接着，维纳创立了控制论，申农创立了信息论。

圣菲研究所（SFI）第一任所长考温认为，复杂性科学作为一门科学，以及对复杂性的现代兴趣的唤醒，肇始于贝塔朗菲 1928 年的工作。也就是说，贝塔朗菲创立的一般系统论标志着复杂性科学的诞生，其标志可以从两方面来说明。首先，从一般系统论开始，“系统”、“整体”和“整体性”成为科学研究的对象，可是在不久以前它们还被看作是超越科学界线的形而上学概念。贝塔朗菲（1987:2）说：“我们被迫在一切知识领域中运用‘整体’或‘系统’概念来处理复杂性问题。这就意味着科学思维基本方向的转变。”其次，一般系统论是第一个反对还原论的科学理论，其方法论是非还原论的。他之所以反对还原论，是因为他认为传统的还原论科学仅能认识系统的各组成部分，而不适用于研究系统的“关系”，“为了理解组织的完整性，应当既认识各组成部分，也认识它们之间的关系”（贝塔朗菲，1987:310）。

通讯理论的创始人之一韦沃尔在 1948 年发表的《科学与复杂性》一文，明确宣布复杂性为科学研究的对象，这可以看作科学界向复杂性进军的宣言书。20 世纪 40 年代先后出现的系统论、控制论、运筹学、信息论、博弈论和系统工程等新学科，是人类为对付复杂性而制订的第一批理论和技术。他们为复杂性科学锻造了第一批科学概念，如系统、组织、信息、通讯、反馈、控制、信息熵、整体性、秩序性等，对还原论和分析思维的局限性作出了系统的清算，初步验证了系统方法处理复杂性的有效性，为复杂性科学的正式问世做好了准备。

由于涉及的系统越来越庞杂，上世纪 70 年代，控制工程和系统工程界提出了大系统理论，以处理大系统和简单巨系统。大系统理论提出了系统层次的概念和理论。20 世纪 80 年代，以钱学森为代表的中国系统科学界提出了开放的复杂巨系统理论，明确提出了系统的不可还原性，并创造性地提出了定性和定量相结合的综合集成方法的方法论原则。

（二）非线性科学来源

传统的系统理论，除钱学森提出了开放的复杂巨系统理论外，从本质上

来说，主要是分析系统的结构、功能等，属于静态分析，而且基本上是没有组织主体参与的被组织系统。从70年代普里高津提出耗散结构理论开始，系统理论关心的焦点从存在走向了演化。由耗散结构理论、协同学、突变论和超循环理论构成的自组织理论，突出了系统自身的主动性，强调了自身的演化。在这一阶段，复杂性科学研究系统的演化，研究系统从无序到有序或从一种有序结构到另一种有序结构的演变过程，所用的方法既包括物理实验或模型、数学模型分析，也包括计算机模拟等，因此其方法论是非还原论的。在研究演化方面，还原分解方法的作用十分有限，因为还原分解方法主要用于研究物质的组成结构。研究演化的主要方法是整体研究方法，即在保持系统整体完整的情况下，利用模型、模拟等手段来研究系统的整体演化行为。

这些复杂性科学理论之间存在着密切的联系。耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、混沌理论和分形理论这些自组织理论，分别研究了自组织现象的不同方面。耗散结构理论是解决自组织出现的条件环境问题的，协同学基本上是解决自组织的动力学问题的，突变论则从数学抽象的角度研究了自组织的途径问题，超循环论解决了自组织的结合形式问题。这些理论都为复杂性科学的发展作出了重大贡献，或者说成了现今复杂性理论的重要组成部分。

20世纪80年代，随着混沌、分形以及孤立子理论的提出和发展，非线性科学有了长足的进展。反观过去，人们才发现，其实耗散结构理论、协同学、突变论和超循环理论研究的基本上也是非线性问题。混沌、分形和孤立子理论等更加揭示了由系统非线性带来的丰富内容，简单要素的非线性相互作用就可能产生复杂的行为。混沌和分形理论从时序和空序的角度研究了自组织的复杂性和图景问题，从而成为复杂性科学的重要理论来源。

（三）圣菲学派的直接贡献

复杂性理论最直接的理论来源是美国圣菲研究所开创的复杂系统理论。1984年5月圣菲研究所在美国成立，是复杂性科学进入新阶段的标志，也是复杂性范式初步形成的标志。

圣菲研究所在复杂性科学研究方面所涉及的主要内容有：复杂适应系统、非线性系统（如元胞自动机）、标度、自相似、复杂性的度量、经济复杂性等等，这些研究都取得了令人瞩目的成就。例如，霍兰对复杂适应系统的研究，连续出版了《隐秩序》、《涌现》等专著，提出了代表这一时期的著名观点——涌现论，在国际上产生了巨大的反响。1994年霍兰正式提出了复杂

适应系统理论，其基本理论和思想在《隐秩序——适应性造就复杂性》中得到表达，在《涌现》一书中更加深入和拓展。前面在回顾复杂性科学的发展历程时已经对圣菲研究所的工作做了比较详细的介绍，这里就不再赘叙。

四、复杂性科学兴起的技术基础

科学伴随人类已数千年，近代科学诞生也已数百年，复杂性现象为什么到现在才被人们真正认识和重视，复杂性科学现在才宣布诞生呢？我们说过，大致有两方面的原因，一是就各门学科来说，以前还都是“富矿区”，没有必要去选择开采那些难度大的矿产。随着传统学科逐渐变成“贫矿区”，则迫切需要寻找“开采、选矿”的新方法。二是复杂性科学都是涉及一些难度大的工程，传统的手段是没有办法完成的，只有待计算机时代到来才能做到。因此，复杂性科学的诞生除了前面所说的哲学背景、实验事实和理论来源外，一个很重要的条件是技术基础问题。

非线性问题并不是一个近期才出现的新问题，也不是新的科学概念。由于复杂性往往与非线性紧密联系在一起，因此，近数十年来，在自然科学、工程技术甚至社会科学各领域，广泛深入地开展了非线性问题的研究。然而，传统科学方法面对非线性问题却无能为力，因为传统的科学方法主要是建立微分方程，然后是解方程，求得方程的解析解。但是，非线性方程由于其相互作用，基本上无法得到解析解，只有几个特殊方程能够做到。在得不到一般解析解的情况下，科学家有两种方法，第一种方法是将非线性方程线性化，但这是一种危险的方法，往往把关键的东西丢失殆尽，因此从方程的解中根本看不出有什么新质产生，故而也就失去了发现复杂性的机会，更没法揭示出复杂性的秘密。第二种方法是求数值解，通过数据迭代来得到方程的数值解。然而，这项工作极其庞杂艰难，在计算机问世之前，也只有个别简单的方程能求得数值解。一般的方程在理论上可以求数值解，但因缺乏有效的计算工具，实际上几乎无法进行。

1948 年第一台数字电子计算机在美国诞生，这是人类认识世界、改造世界的一场伟大事件。它标志着人类对信息处理本质的深刻认识，同时也是威力巨大的计算手段。信息处理原本是人的智能，电子计算机的诞生宣告了对人类智能的机理有了基本的本质性认识，并且实现了人的处理信息的智能可以部分由人造物代替。第一代电子计算机的出现后，它的更新换代的速度十分惊人，由原来每秒做数万次运算到现在的微机每秒都能做几百亿次运算，因此原来难于解决的艰难的运算问题便迎刃而解。这样，原来没有办法解决的非线性方程的数值解可以交给计算机去解决，非线性研究由

于计算机的出现而有了突飞猛进的发展。由于非线性理论研究的突破,由非线性带来的复杂性问题也就被推到了前台。这就是为什么非线性和复杂性的突破性进展都发生在计算机出现之后的原因。

电子计算机为复杂性科学提供了强大的分析工具。混沌现象的发现本身就是计算机应用的一个奇迹。我们说过,气象学家洛伦兹就是用一台很落后的计算机对气象方程进行模拟仿真时,发现了在确定论的系统中也会出现混沌现象(詹姆斯·格莱克,1990:10-24),从此,计算机成了后来混沌研究的基本工具。在分形理论中,复杂的分形图也是由一些简单的算法通过计算机的反复迭代而产生的。要是离开了计算机,这些工作都是不可想像的。在复杂性科学中所用到的理论工具除了传统的微分方程和形式逻辑外,还要用到自身特有的一些方法,例如,在不确定条件下的决策技术、综合集成技术、整体优化技术、计算智能、非线性技术、模拟仿真技术等(成思危,1999:7)。这些方法也都离不开计算机,特别是模拟仿真技术更是由计算机的应用才出现的一门新方法。这种方法有别于一般的实验方法,完全通过它来对模型进行仿真,现在成为科学发现和研究的重要方法,现在已广泛用于复杂性科学的研究中。其中比较著名的有人工生命、元胞自动机、竞争—合作模型、大群模拟工具 SWARM 等。圣菲研究所的霍兰的遗传算法、复杂适应系统理论、回声模型;朗顿的元胞自动机、人工生命研究;帕·巴克通过沙堆模型对自组织临界性的研究;阿瑟对经济复杂性的研究,全依赖于计算机。可以说,没有计算机,也就没有圣菲研究所现在的研究和成就,当然也就没有当今的复杂性科学。到此,我们完全可以说,计算机是复杂性科学的重要的技术基础和研究手段。

五、复杂性科学兴起的建制历程

复杂性科学建制化的标志是圣菲研究所的成立。正是由于 SFI 的成立,复杂性科学才成为一门显学,成了世界科学研究的热点。可以说 SFI 是复杂性科学的催生婆和接生婆,在它的催生下,复杂性科学迅速完成了建制化的历程。SFI 的研究具有如下四个主要特色:跨学科性、卓越性、推动性和新颖性。目前,他们主要集中在下面五个研究领域:演化动力学、网络动力学、物理和生物系统中的计算、经济和社会相互作用、鲁棒性(Robust)。这些领域的共同特点是都与复杂性科学相关联,是复杂性科学的前沿课题,都为开创复杂性的新局面作出了贡献。霍兰对复杂适应系统的研究,朗顿对人工生命的研究,帕克对自组织临界性的研究,阿瑟对经济复杂性的研究等,都是复杂性科学的代表性成果。SFI 还为复杂性科学开发了通用的计算机软件

平台:SWARM。此外,他们还创办了专门的复杂性网站(http://www.santafe.edu),复杂性科学的专业杂志《复杂性》(*Complexity*),并且出版了一系列的复杂性连续出版物,举办复杂性暑期讨论班,为复杂性的建制化作出了重大贡献。现在SFI已成为复杂性科学的专门机构和前沿阵地及研究中枢。由SFI的故事写成的《复杂性》一书,在全世界成为畅销书,为复杂性科学的普及宣传作出了重大的贡献。

在圣菲的影响下,复杂性科学成了一场声势浩大的运动。在这场复杂性运动中,各地纷纷成立复杂性科学的专门机构,例如,丹麦的玻尔研究所,美国的布卢克海汶国家实验室,美国普林斯顿NEC研究中心,由北欧国家联合组成的NORDITA,意大利国际理论物理中心,甚至还有关于复杂性的公司,像由SFI考夫曼开办的Biosgroup,以及由法默开办的Prediction Company,均取得了很大的成功。在《复杂性》杂志之后,又有*Advances in Complex system*,*Chaos*,*Complexity International*,*Economics & Complexity*,*Emergence*等探索复杂性的传统或电子杂志先后创办,有关复杂性的专著更是雨后春笋般问世,形成了一股复杂性的出版热。这样,复杂性的观念得到了迅速的传播,复杂性科学的快速建制化,致使复杂性科学迅速成为热门研究领域。

第三章
复杂性科学的方法论

我们说过，复杂性、复杂系统和复杂性科学如果作为研究对象都难于区隔和界定，于是大家比较倾向于从科学方法论上来划分自己的领域。最有代表性的是我国科学家钱学森的观点。他绕开抽象的概念定义，从方法论上来认识复杂性，认为"凡是不能用还原论方法处理的，或不宜用还原论方法处理的问题，而要用或宜用新的科学方法处理的问题，都是复杂性问题。"许多复杂性研究者都认为，在科学研究方法论上复杂性科学正进行着一场变革。这场方法论变革有什么样的表现，意义何在，它与传统的还原论、整体论有何联系和区别，又如何超越它们，这些问题都需要我们作出回应。

第一节　复杂性科学与还原论

复杂性科学导致的科学方法论变革的表现在对待还原论的态度上，有人认为，复杂性科学是超越还原论的，有人甚至认为复杂性科学与还原论彻底地不相容，是彻底的反还原论的科学研究。在最近几次召开的全国复杂性系统科学哲学研讨会上，许多学者在讨论或介绍复杂系统和复杂性科学时，往往突出地强调并断言复杂系统或系统复杂性的"本质特点"是它的不可还原性，并且往往笼统地把还原论与机械论相提并论或等同。这些论断成了会议上的某些基调报告中的基本论点(林定夷，2003:366)。但仔细推

敲,这些论点只不过是一些断言,缺乏论证。复杂系统或系统复杂性的"本质特征"真的是"不可还原性"吗?复杂性科学真的与还原论不相容吗?

一、还原论的内涵及其分类

(一)还原论的历史嬗变

"还原论"一词十分年轻,它是20世纪的产物。第一个用到它的是著名哲学家蒯因(W. V. O Quine)。1951年蒯因(1987:19)在《经验论的两个教条》一文中正式提出还原论(reductionism)一词。他在这篇著名的科学哲学论文中指出,经验论有两个错误的教条:一个是分析命题和综合命题的区别,另一个是还原论。由于蒯因的引入,"还原论"一词在科学哲学中使用的频率越来越高,到20世纪50年代后期,已扩展到许多领域,而且内涵和外延都得到了拓展。

虽然还原论的概念历史不长,但还原论信念(又被称作还原主义)本身却久远得多,许多哲学家和科学家曾对它进行过考察和研究。在中国文化中,把对象分解为它的组成部分加以研究的做法古已有之,庄子赞扬的"庖丁解牛",中医讲的五脏六腑,就是例证。在西方文化中,还原的信念更是源远流长,古希腊的先哲们大部分都有这样的思想,例如,泰勒斯的水,赫拉克里特的火,德谟克里特的原子与虚空,亚里士多德的四因说等等,都试图把自然现象的复杂性认识归结到寻求一种或几种本源。但无论古中国,还是古希腊等其他古代民族,都没有形成系统的分析方法,更谈不上形成现代还原论这种完整的方法论。

从科学和哲学思想上说,还原论和分析思维的主要奠基者是笛卡尔,他在从事具体科学研究的同时,特别关心科学思维方式和方法论的探索,倡导通过仔细的演绎推理从基本的不可还原的思想中追求真理。因为他相信存在"所有物体的普遍的质",科学的目的就是把一切对象都还原为这种"质"(切克兰德,1990:58)。基于这种认识,笛卡尔(2000:16)提出适用于指导人们思维活动的四条原则,相当完整地规定了还原论和分析思维的基本内涵:

第一条是,凡是我没有明确地认识的东西,我决不把它当成真的接受。也就是说,要小心避免轻率的判断和先入之见,除了清楚分明地呈现在我心里,使我根本无法怀疑的东西之外,不要在我的判断里多放一点东西。

第二条是,把我所审查的每一个难题按照可能和必要的程度分成

若干部分，以便一一妥为解决。

第三条是，按次序进行我的思考，从最简单最容易认识的对象开始，一点一点逐步上升，直到认识最复杂的对象；就连那些本来没有先后关系的东西，也给它们设定一个次序。

第四条是，在任何情况之下，都要尽量全面地考察，尽量普遍地复查，做到确信毫无遗漏（笛卡尔，2000：16）。

上述引文的核心为第二条，“把我所审查的每一个难题按照可能和必要的程度分成若干部分，以便一一妥为解决”，就是说，一个理论的或实际的问题摆在面前，如果你觉得它太复杂，无从下手，就把总问题分解为若干子问题，即把整体分解为部分，把一个个子问题或部分搞清楚了，总问题或整体也就能够搞清楚；如果这些子问题或部分仍然复杂难解，就对它们再行分解，去研究那些更小也更容易理解的对象；如果它们仍然显得复杂，那就继续分解，直到找出那些不再复杂的更小对象为止。简而言之，笛卡尔主张细分问题并逐条分析之。笛卡尔的方法论思想经过从牛顿到爱因斯坦历代科学大师的补充和发展，特别是经过四百年科学实践的检验和锤炼而不断完善，终于形成还原论和分析思维在现代科学中全方位的支配地位。

笛卡尔的上述观点虽然影响甚大，但还没有形成精粹的哲学思想。精致的还原论思想是由卡尔纳普、亨普尔等逻辑经验主义者发展起来的。在20世纪二三十年代，他们不加限制地推广使用还原方法，试图通过不同学科之间的严格还原，来达到学科间的理想统一，从而消除学科间的混乱和分歧。一般还原论的思想是建立在这样一个基本假设之上，即“表面上不同种类的存在物或特性是同一的。他声称某一种类的东西能够用与它们同一的更为基本的存在物或特性类型来解释。”（尼古拉斯布宁，于纪元，2001：6）20世纪60年代初，美国科学哲学家欧内斯特·内格尔（Nagel，E.）（2002：403-407）把它表述成标准的还原模型，清晰明确地表达了还原论的思想，并引起了很大的影响，成为还原论的经典表述。后来，普特南（Putnam. H）、奥本海默（Oppenheim. P）以及历史学派的库恩（Kuhn. T）、费耶尔阿本德（Feyerabend. P. K）等科学哲学家都对还原论问题做过不同的论述（Rosenberg，2001：135-163）。

（二）还原论的涵义

对还原论的涵义，最经典最权威的表述要数内格尔（2002：403－407）的表述了。内格尔认为，所谓还原指的是两个理论之间的关系，而所谓理论必

须包括基本理论规律和特有的理论词项和观察词项，且已作了明确的表述和界定。这样，令 T_1 和 T_2 为两个理论，则说 T_2 还原为 T_1，当且仅当(1) T_2 上的术语能通过 T_1 上的术语来定义，而且(2) T_2 上的规律可以从 T_1 上的规律导出。这两个条件分别被称为可连通条件(the condition of connectability)和可导出条件(the condition of derivability)。

所谓可连通条件，形式地说就是对于 T_2 中的所有不出现于 T_1 中的每一个词项 M，总存在着出现于 T_1 中而不出现于 T_2 中的理论词项 N，使得：

$$(x)(N(x) \longleftrightarrow M(x))$$

或

$$(x)(N(x) \longrightarrow M(x))$$

成立。这两个陈述，被称为桥接原理(bridge principle)，有时又称为"对应规则"，因为它像一座桥般将 T_1 与 T_2 这两个不同理论或不同学科的词项相互连接起来。当然，内格尔明确指出，这种桥接原理的主要表达形式是双条件语句，并且桥两岸的概念只要求有共同的外延。科学理论中有大量说明这种桥接原理的案例。例如，青霉素、胆固醇、尿素这样一些生物学的术语，经过多年的研究，被证明可以用一定的分子结构的纯粹化学的术语来"定义"。热力学中的"温度"与统计力学的"理想气体分子平均动能"是相对应的。

所谓可导出条件，是指一个理论 T_2 欲还原为理论 T_1，必须要求 T_2 的所有规律必须由 T_1 的规律以及相关的桥接原理逻辑地推导出来。令 L_2 与 L_1 分别为 T_2 与 T_1 的规律，B 为桥接原理，则可导出条件可表示为：

$$(L_1 \& B) \vdash L_2$$

这里的 $\vdash$ 表示推出。

上述所表达的就是所谓的理论还原的"内格尔模型"。内格尔模型虽然表述精确明晰，但他论述的只是理论的还原。美国科学哲学家瓦托夫斯基(Wartofsky, M. W.)(1982:490)认为，还原论有两种涵义，一是在考虑经验的意义时，指的是"所谓的理论术语还原为观察术语的问题"；二是考虑不同学科之间的关系时，指的是"把不同的科学还原为某种理想化的统一体的方法论论据"。美国学者欧阳莹之(2002:56)认为，还原论是关于概念、理论和学科之间关系的学说：

> "它们认为存在一个初级学科，次级学科可以且应该被还原成该基本学科。一个次级学科中的谓词被还原了，如果它可以唯一地用基本学科的词汇来定义。如果一条定律是由基本学科的定律推导而来，该定律就被还原了；一个理论被还原了，就是该理论中的每一语句都被翻译成基本学科中的语句，表达了同样的事实而没有含义的丢失。被还

原的谓词、定律和理论，以及次级学科本身，都不是必不可少的，因为它们可以被上级的初级学科所替代。比如，如果心理学的概念和理论原则上可以用物理学的概念和理论予以消去的话，则心理学可还原为物理学。为了强调被还原理论的必不可少性，还原论有时被加上了多余的限定：消去性。它构成了这种说法的基础，即被还原的理论（reduced theory）仅仅是，或者不过是还原理论（reducing theory）的应用或逻辑结果。由于概念能使事物可理解，被还原概念的消去表明，用这些概念表示的事物不过是（nothing but）用还原的概念表示的事物。”

斯克利文（Scriven，1985：123）曾指出，“还原论者是那些认为可以把光学和化学还原为关于波、场和粒子的物理学，把心理学还原为可观察的行为研究，把生物学还原为化学，把历史学还原为心理学，或把伦理学还原为决定论等观点的人。”（转引自：李建会，2002：72）著名哲学家奥本海默与普特南则从四个方面概括了还原论纲领的基本内容（转引自：李建会，2002：72）：

（1）一个很好发展的还原概念，与部分-整体关系的观念是不矛盾的。

（2）科学的有秩序的不同分支描述了实在的不同水平，特定水平上的事情是由属于较低水平上的简单元素所组成的。

（3）科学统一性的方案是建立在科学的基本的水平——物理学之上的。

（4）在宇宙的进化过程中，给定水平上的客体相互结合，构成属于较高水平的整体，时间上较晚出现的事情可以根据时间较早的事情和过程来解释。

李建会认为以上纲领包含了三种意义上的还原：①组成的还原论：在自然系统中，高层次事物是由低层次的事物构成的。②解释的还原论：可以根据较低水平上的事物的性质解释和预言较高层次事物的性质。③理论的还原论：不同科学分支描述的是实在的不同水平，但最终都可建立在关于实在的最基本水平的科学——物理学之上（转引自：李建会，2002：72）。

就建立统一科学的纲领而言，还原论所依据的前提是：一种科学的理论可以用另一种更为基本的科学理论来进行系统的解释，换言之，即复合体的定律可以还原为关于构成复合体的部分定律。正如内格尔（2002：405）所说：“还原的目标是要表明，次级学科的定律和一般原理只是初级学科的假定逻辑结果。”由此可见，所谓还原的对象既可以指物理世界中的存在物，也可以指人类所创造的知识体系，因而存在着不同层面上的还原论，即本体论

上的还原论和认识论或方法论上的还原论。

(三)还原论的分类

根据上述还原论的涵义,可以从四个不同角度将其进行分类。

首先,根据还原论所涉及的学科范围,还原论可分为狭义还原论和广义还原论。狭义还原论特指生物学中的近代力学还原论以及其后发展而成的物理化学还原论;广义还原论则指涉及一切科学领域的一般哲学意义上的还原论。

其次,根据还原论所包含的本体论意义、方法论意义以及还原的具体实现途径,又可分为本体论还原论、方法论还原论和理论还原论。其中本体论还原论是指不同运动形式间高级运动形式归结为低级运动形式之观念;同一运动形式内的高级层次归结为低级层次之观念。本体论上的还原论以物质世界的本体"同一性"为前提,认为各种物质形态归根到底可以约化为一个最基本的层次,并从支配这一基本层次的物理规律出发来解释更高层次的规律。具体地说,本体论上的还原论包含了以下一些基本主张:①无演化性。物质系统不同层次之间的还原中不存在时间的演化维度,即在还原的过程中不考虑时间的不可逆性。这样,系统演化过程中出现的涌现等现象就被抹去了。②可分解性。在还原过程中潜在的假设是同类事物或非同类事物可以分解为更为基本的组分或元素,而在分解的过程中原有信息不会丢失。③线性因果关系。处于还原过程中的事物间只存在线性的因果关系,因此,一事物的变化只引起另一事物量方面的变化。④叠加原理。就是说,一个系统的整体功能只是其各个部分的功能的线性组合。方法论还原论是指一种科学认识与研究的原则。它指以较低级的物质层次、较简单的物质运动形式去分析和认识较高级的物质层次较复杂的物质运动形式。理论还原论则是指用较为成熟的理论去理解和表达较不成熟的理论。

再次,理论还原论又依理论间的异同关系分为不同理论间的同一理论内部的同类还原与非同类还原(内格尔,2002:406)。同类还原(homogeneous reduction)指的是,被还原的理论是还原理论的一部分,同种类的理论最终达到统一,例如把牛顿力学看作是相对论的特例。这种还原在解释科学史方面非常有价值。科学理论经常会被一些更综合的理论所取代,就像牛顿力学被相对论力学所取代一样,后者的研究领域覆盖了牛顿力学的研究领域,还有其他相同例证。在这种情况下,人们通常会认为领域窄的理论可以被还原的,原则上并非是必不可少的,因为它是更宽泛理论的一种特殊或极限情况。非同类还原(inhomogeneous reduction)指的是:被还原的理论和还原

的理论分析覆盖了不同的现象领域,例如化学还原为物理学。通常次级理论中包含了在基本理论中不存在的术语和概念,就像心理学概念在物理学中不存在一样。因为逻辑演绎不能制造出一个在前提中不存在的术语,还原过程就必须通过桥接原理来使不同的概念发生联系。在经过许多争论之后,哲学家们公认要想使还原获得成功,这种桥接原理必须要么是次级概念的清晰定义,要么是指明使用次级概念的必要条件和充分条件,这两种条件都须完全用初级概念来表达。其实,这些严格的条件在实际的科学理论中很少遇到,原因在于能获得满足于更为随便的关联。

最后,依据理论间还原的强弱程度不同,还原论又分为强还原论与弱还原论。强还原论体现的是一种无条件的绝对的完全的还原观念。它指一个理论的全部术语、规律还原为另一理论的术语、规律而不借助于任何附加条件和原理。与此对应,弱还原论则是一种有条件的相对的部分的还原观念。它指两理论间还原之实现须依赖于一定的附加条件与原理(即桥接原理)。就实际情况而论,弱还原论则更接近于科学理论还原的实际状况。

本体论和方法论两个层面的还原论之间存在着一定的联系。如果我们主张方法论上的还原论,认定可以找到足以描述和解释物理世界中不同组织层次现象的一种统一基本理论,并能从中演绎出其他较为特殊的理论,那么,我们实际上预设了物理世界是可还原的,即允诺了本体论上的还原论。反之则不然。也就是说,即使我们承认在本体论上物理世界是可还原的,但并不一定要允诺认识论或方法论上的还原论,因为我们认识和理解物理世界的能力是有限的。

(四)还原论与还原方法

"还原论"和"还原"这两个词经常一起出现,然而作为一种科学研究方法的还原方法,与还原论既有联系又有区别。"还原"一词很早就被使用,意思是"减少"、"简化"、"把一种形式变换为另一种更为简单的形式"、"把一种语言变换成另一种语言"等。科学中运用到它是在18世纪,意思是指把化合物变化成相对简单的元素(其反义词是"氧化")。

随着伽利略、牛顿开创了近代意义上的科学以来,还原方法在科学发展中发挥了巨大的作用,至今仍然在科学研究中广泛地运用。但它与哲学意义上的还原论有着实质性的差异,据如前所述,还原论在哲学中有其特定含义,而还原方法则是把对象分解为部分或更低层次加以研究的一种策略,主要是在受控实验中对研究对象进行"分析—重构"。运用还原方法,人们可以把研究系统从环境中分离出来,把它分解为部分或把高层次归约为低层

次，再用部分及它们之间的组合来解释或预测整体的功能，例如化学反应可还原为分子或原子的组合、分离或取代。在科学理论中，运用还原方法可以把理论还原为命题，把命题还原为概念，并进一步用基本概念去定义或说明其他概念，例如用分子的随机运动来规定宏观意义上的“热”的概念。

事实上，还原论是一种基于还原方法所形成的哲学思想。由于人类在认识和控制自然的过程中运用还原方法获得了巨大的成功，结果给人们造成了这样的印象：这个世界本质上是可还原的，因此运用还原方法我们能够（至少是原则上）对世界获得完美的认识，与此相应，各门学科间也能实现完美的统一。而这正是还原论的核心思想。可见，还原论是对还原方法的认识功能不加限制地扩大的结果。这样一来，我们也就能发现两者之间的区别，主要表现为：

（1）还原方法对科学研究来说是必要的且有效的，而并非是充分的。人类认识世界的手段存在着一定的约束，在科学研究的过程中人们一般要先以分析的方法切割自然，然后再综合各研究部分以达到对整体的认识，科学发展的历史表明这样的方法是有效的，已经大大地提高了人类认识世界的水平和控制世界的能力。然而，这样一种还原的实现通常需要对研究对象进行简化，由此就有可能导致整体原有信息的丢失，只获得简单的机械的认识结果，所以运用还原方法对认识事物而言一般来说是不充分的不完备的。而还原论则认为运用还原方法能够达到对整体或高层次的充分而完备的认识。如果还原论成立的话，那么运用还原方法就可以使科学理论在整体上得到统一，从而把各门科学归结为一种最终的完整的理论。

（2）还原论是一种强还原，它试图从本体论和认识论上对研究系统实现从整体到部分或从高层次到低层次的严格还原；而还原方法则是弱还原，它要求有一些适当的辅助性假设，例如从理想气体定律（$PV = RT$）到气体分子运动理论的还原，不但要增加关于“P”、“T”的还原定义，而且还需要分子作随机运动的假定。另外两者还有目的、方法、结果上的区别，例如逻辑经验主义者主张的还原论的目的是要消除学科间所谓的“混乱”，目的是要达到各门学科的大统一等，而还原方法的目的是要通过对有限的局部领域简化和抽象来揭示自然界的基本性质及其规律。

在研究自然界时还原方法预设了一个本体论前提，即世界的可分解性和叠加性，也就是说，一个系统由可分解的部分构成，而这些部分的简单组合又可以重构整体。基于这样的假设，就形成了可以把系统简化和分解为各个部分或把高层次还原为低层次加以研究这一方法论原则。这一原则促成了近代实验科学的兴起和发展，结果导致人类对于自然界的认识水平和

控制自然的能力大大提高。但是,随着现代科学的进一步发展,还原方法的适用性在一定程度上受到了限制,它的使用范围一般仅限于简单的多体系统(many-body system),即一种由少数几类彼此之间仅由几种关系耦合在一起的大量组分组成的系统。

二、对还原论的一般评价

还原论在近现代科学的发展中的确功不可没,但面对科学的进一步发展,常常又力不从心,日益受到人们的批判。我们怎样来看待还原论的历史功过呢?(Rosenberg,2001:135-163)

(1)本体论的还原。本体论还原论所持的不同运动形式间高级运动形式归结为低级运动形式,以及同一运动形式内高级层次归结为低级层次的观点无疑是错误的,或者至少说是极端片面的。

本体论还原论根据之一乃不同运动形式间以及同一运动形式不同层次间的连续性与联系。必须承认,本体论还原论认识到高、低级运动形式间,以及同一运动形式内高、低层次间的包含与被包含关系这一连续性与联系,这无疑是十分可贵的。但据此进而断言高级运动形式(或同一运动形式的高级层次)决定于,且归结为低级运动形式(或同一运动形式的低级层次),这显然是毫无根据与十分荒谬的。显然,两者的连续性与联系本身决无理由表明它们间质的差异与特殊性的消失。事实上,任何高级运动形式包含低级运动形式(或同一运动形式内高级层次包含低级层次),但同时它们又是含有质的新特点的涌现的形式(或层次)。本体论还原论的根本错误之一在于它否定了不同运动形式间(或同一运动形式内不同层次间)质的差异性与矛盾的特殊性。其实,在如下意义上才可认为它们之间是可归结与不可归结关系的统一体,并且其中的不可归结性则更为根本,即就它们之间的连续性与联系而言是可归结的,从而从低级运动形式(或同一运动形式的低级层次)出发可推出高级运动形式(或同一运动形式的高级层次)的部分性质;就它们之间质的差异与特殊性而言则又是根本上不可归结的,因而高级运动形式的性质又不可由低级运动形式的性质(或同一运动形式内高级层次性质不可由低级层次性质)全部推出。事实上,还原的目的在于帮助我们理解现实的层次结构而不是本体论还原论所主张的去弥平层次间的差别。

本体论还原论的根据之二是所谓的科学统一性。本体论还原论认为整个科学最终将统一为物理学,或者说任何其他运动形式将最终被还原为物理运动形式,且还原是实现科学统一的唯一途径。事实上,科学的统一尽管是科学发展的基本趋势与崇高目标,但物理学作为唯一的还原终极目标理

论的合理性值得怀疑(现代还原论的还原目标理论的多元性便是明证),而且还原也不是实现科学统一的唯一途径。事实上科学的整合(即将科学问题放入更广阔的脉络中考察以寻求对其统一性或系统性的理解)也是实现科学统一的重要途径。由此可见,世界远比还原论者设想的更丰富,它包含着不可削平的复杂层次结构。本体论还原论恰恰是在强调科学统一性的同时却以世界的多样性与层次结构的牺牲作为代价。

本体论的还原论最终导致了机械自然观的产生。机械自然观最本质的特征是把宇宙看做是一只上帝已替它上紧了发条的大钟。"世界是一部钟表机器,行星在其轨道上永不休止地运转,所有系统在平衡中按决定论而运行,所有这一切都服从于外部观察者能够发现的普适定律。"(布里格斯,1998:22)这是一种机械论的还原论观点。本体论的还原论本质上是钟表匠的自然观。一只钟表可以拆散成各个组成部件:嵌齿、擒纵杆、弹簧和齿轮。还可以用这些部件把它装配起来。还原论设想,大自然同样可以加以组装和拆散。还原论者认为,最复杂的系统也是由弹簧、嵌齿和擒纵杆的原子、亚原子这些等价物构成的,大自然是以无限精致的方式组合起来的。还原论"把宇宙视为机械系统,此系统由相互分割的客体构成,而这些客体又可以还原为基本的物质构件,构件的性质和相互作用彻底地决定着一切自然现象。笛卡尔的自然观还被引申用来解释生命机体,生命机体也被视为由相互分割的部件构成的一部机器。这种机械论的观念现在仍然是我们大多数学科的基础,并对我们生活的各方面继续发挥着极大的影响,它导致了学术界和政府部门的支离分割,自然环境与社会被分割为许多部分,兴趣不同的小组分别征服、开发其中之一"(卡普拉,1989:29-30)。作为本体论的还原观现在越来越被批判,并逐渐退出了学术舞台,不过在现实生活和思维中还有很大的影响。

(2)理论间的还原。用较为成熟的理论去理解与表达较不成熟理论的理论还原论是一种促进科学进步的积极纲领,也是实现科学统一的基本途径之一。因为理论还原经由不同理论间的解释与表达而实现,这种解释与表达势必会形成不同理论之间的更替,从而使较为专门的理论发展成为更为简洁更具解释能力的较为普遍的理论,并进而推动着科学的不断进步,不断缩短科学走向统一的进程。纵观整个科学史,科学理论还原的理想一直推动着科学的发展。事实上,整个近代科学几乎是在牛顿力学的理论还原指导下得以建立的,同样整个现代科学也是在现代物理学、现代化学、现代生物学等理论还原指导下向前推进的。

还原论方法在科学理论和学科间的还原中也遇到了许多困难。逻辑经

验主义学派试图从方法论上还原各门学科并且做了大量的工作。卡尔纳普认为统一的概念由语言的统一和定律的统一组成，但是主张前者的统一与科学更加相关，而且比后者更有可能实现。他们“把科学大致分为物理理论和生物理论（在这两个术语最广泛的意义上使用）。语言的统一将通过还原来实现，不是把生物的还原为物理的（或反之），而是把两者都还原为它所谓的（物理）“事物语言”（thing-language）（刘闯，2003：28）。但是这一思想受到很多责难，有的学者指出，为了描述条件和结果所需的任何东西都和卡尔纳普的“事物语言”相矛盾，但是我们不得不描述条件和结果以形成我们的知识，这就构成了一个无法消除的矛盾。在具体的还原过程中逻辑经验主义学派把理论术语通过一定的对应规则转换成观察术语，其主要目的是避免出现理论术语的不可观察性和不可证实性，从而避免理论名词成为与形而上学一样的无意义命题。关于这一命题，卡尔纳普提出两层语义模型，坎贝尔提出“假说”和“词典”，亨佩尔提出安全网模型理论等等，但是都遭到了各方的责难，而且随着时间的推移，学派内部也发现自身理论的缺陷，不得不对自己的理论进行修补甚至倒退。例如其中的理论性名词与经验性名词无法严格区分，对应规则的不完全性等都无法完全解决。之后拉姆塞（Ramsey）采用数理方法（后被称作拉姆塞语句），试图运用存在性命题来消除全称命题，但由于这一形式过于复杂，不具有可操作性，最终这个极具创造性的想法未能解决对应规则的问题，至此还原论思想陷入困境。

应该承认，科学理论还原的实现不是轻而易举的，且纵使得以实现也还只是理论的部分还原。其根本原因在于不同运动形式（或同一运动形式内的不同层次）间的质的差异使然。此外，理论还原只是实现科学统一的途径之一，能产生理论之融合、合并乃至全新的综合性新学科的理论之整合也同样是另一重要途径。这就昭示我们，在科学走向统一的历史道路上，理论还原与理论整合应互补地结合起来。

（3）方法论的还原。方法论还原论作为一种科学认识与研究的方法是必要的，这既是科学发展的必然要求，同时也与人的认识规律相符合。事实上，方法论还原论是一种旨在将复杂性分解为更为简单的组成部分以研究其本质与规律的认识复杂性的方法。在它看来，高层次上所发生的一切，都可以用靠近于该层次的低一层次的术语与规律加以解释。正因为此，方法论还原论备受科学家与大多数科学哲学家推崇。科学哲学家波普尔（1999：362）就是其突出代表。他不仅列举了科学史上利用还原方法导致科学取得成功的大量实例，而且还旗帜鲜明地提倡科学家在科研中应充分利用还原方法，尽量进行还原的尝试。

方法论还原论具有以下两个主要特点，且正是这些特点决定了应将方法论还原论与整体论认识方法（即由表及里、由现象到本质的认识方法）互补并用。其一，方法论还原论包含了一种通过认识事物的各个部分而达到认识事物整体的方法。现已知道，任何整体的性质可以小于、等于或大于其各部分性质之和。但由于任何整体都由其具体的部分构成，因而认识整体就必须认识构成整体的各个部分以及各个部分之间的相互联系和相互作用，从而认识部分就构成了认识整体的必要前提。事实上，离开了对各个局部机制的认识，对整体的把握也便成为贫乏的抽象。尽管部分认识可以使整体认识变得更为深刻更为具体，但它毕竟不能代替整体认识。于是一种整体论认识方法（即遵循高级运动形式决定低级运动形式或同一运动形式内高级层次决定低级层次的原则）便成为方法论还原论的必要补充。其二，方法论还原论包含了一种由里及表、由本质到现象的认识方法。它主张从事物内部、从对构成事物组成要素的考察入手以探索事物的规律。但是同现象与本质之间的对立统一关系相对应，这种由里及表、由本质到现象的认识方法也应与由表及里、由现象到本质的整体论认识方法相结合。综上所述，方法论还原论实际上强调了一种分析方法，而上述的两个特点正是这种分析方法的具体展开。因此这种以分析方法为主的方法论还原论也不能将其绝对化，而建立一种以方法论还原论为基础的“综合的整体论”将是科学认识与研究的必要（Shanks，Joplin，1999：268-282）。

总之，现代自然科学所提供的越来越多的科学事实证明了还原论的不足。莫里森就物理学内部的统一指出一种有趣的可能性，即理论看上去统一了，而事物（粒子或场）仍然“完全相异”。实际的统一，例如电磁力和弱力相互作用的统一，看起来不过是在“统一”实体内得到某种形式上的统一或数学上的一致性或相似性，它们并不告诉我们任何关于它们实质上的统一（霍金，1996：28）。还原论思想是一种形式上的简化的反映，它忽略了事物本质上的差异性以及事物发展中的整体性联系，忽略了组分之间的切割导致信息的丢失和对整体局势的影响。在量子力学中，观测者成为一个必要的概念或者是潜在变量，以及粒子的动量和速率不能同时确定的不确定性原理，整体性和不可预测性在这里显得尤为重要，这促使还原论思想的瓦解。

还原论在追溯学科间的联系和学科构成的最基本元素时，以因果联系为其理论基点，它的思想本质是因果回溯法的变相表达形式。但是因果回溯的逻辑关联逐渐受到人们的质疑，人们通常在追溯事物的原因时，认为因果律普遍适用于一定范围内的原始条件中的任何同类事物之间。但是它的

不足之处在于,因果解释是演绎规律解释中的最重要的一种类型。它依照结果的必要和充分条件来说明所议事件的原因,然而,“必要”和充分条件是交织在一起的。例如一个原因可以作为一个结果的不必要却充分条件的关系,或者是不充分却必要条件的关系,因此这一关系是一种或然性推理而非必然性推理,由此可知因果回溯法不是必然性推理。这样,还原论试图一劳永逸地解决科学发展问题并达到对未来的准确预测的想法也就落空了。因为即使找到一套完整的理论,也不能表明我们可以一般性地预言事件的发生,因为我们无法避免不确定性原理给我们的预言能力所设定的极限。霍金(1996:28)说:“除了非常简单的情况,我们无法准确解出这些理论的方程,在牛顿引力论中,我们甚至连三体运动问题都不能准确解决。我们用数学方程来预言人类行为只取得了很少的成功!所以,即使我们确实找到了基本定律的完整集合,在未来的岁月里,仍然存在着发展更好的近似方法,使我们在复杂而现实的情形下,能够完成对可能结果的有用预言的智慧富有挑战性的任务。”这是对还原论思想的最大挑战之一。

三、复杂性科学对还原论的批判

复杂性科学的一个总特征是对传统还原论持批判态度,并且企图通过建立复杂性范式来超越沿用了数百年的还原论观点和方法。它要还纷繁复杂的自然世界以本来的面目,用非线性、复杂性的观点来看待这个世界。可以说,复杂性科学是以批判还原论起家的。虽然随着科学的发展,还原论的不足越来越暴露出来,各门学科都逐渐感觉到了还原论的局限,但只有系统论和复杂性科学才第一次这样旗帜鲜明地全面批判、反思还原论,把超越还原论作为自己的研究纲领和特色,并以此特色来划分自己的研究领域。

贝塔朗菲对复杂性科学的探索正是从批判还原论开始的。贝塔朗菲的传记作者马克·戴维森(1999:56)说:“贝塔朗菲一生都致力于反对机械还原论,他认为这个理论不仅在科学上是未经证实的,而且在道德上会导致堕落。”20世纪20年代,当年轻的贝塔朗菲进入生物学领域并完成他的博士论文之时,马上认识到,用还原论的方法所构建的分子生物学等,虽然将生命现象深入到了分子、原子、原子核甚至更加微观的层次,但依然无法真正理解生机勃勃的生命现象,因此,机械自然观和方法论在生物学领域遇到了有力的挑战。他(1999:14)认为,机械论生命观主要表现为“分析和累加”的观点、“机器理论”的观点、“反应理论”的观点,其特征是:把有机体分析为许多基本单位,再通过将这些基本单位的累加的方式解释有机体的性质;把生命过程的有序基础视为预先建立好的机器式的固定结构;把有机体看作本质

上是被动的系统，只有当它受到外界刺激才作出反应，否则就是静止的。他详细分析了这些机械论观点在近现代生物学诸学科的具体表现，尤其指出了传统的细胞理论、生物发生律、自然选择理论、基因论、神经中枢和反射理论等重要生物学理论所含有的机械论倾向和它们的局限性。在二次大战前后贝塔朗菲（1987:25）提出一般系统论之时，全面批判还原论更是成了他建立一般系统论的前提。

一般系统论是第一个全面反对还原论的科学理论，并采用非还原论的方法论。贝塔朗菲（1980:323）写道："我们反对还原论和把现实看作'无非是……'（一堆物理粒子、基因、反射、干劲以及这种那种东西）的理论，与此不同，我们把科学看作是一些'透视法'，这种透视法是具有生物的、文化和语言禀赋和局限性的人创造出来去对付宇宙的。"另外，贝塔朗菲（1987:85）在谈到自己建立一般系统论的动机时，说："迄今为止，实际上只有理论物理学领域符合科学对一般规律的追求，即试图建立一个能解释和预言的规律的系统的要求。结果，物理实在被看作科学的唯一恩赐物。结果是还原论假说的提出，其要点是生物科学、行为科学和社会科学都要按照物理学的范式去把握，最终还原为物理层次的概念和实体。由于物理学本身的发展，物理主义和还原论的论点成了问题，真正成了形而上学的偏见。"他之所以反对还原论，是因为他认为传统的还原论科学仅能认识系统的各组成部分，很不适应于研究系统中的"关系"。他认为，把孤立的各组成部分以及它们之间的关系的性质和方式加起来不能说明系统的性质和方式；不过，如果我们知道各组成部分以及它们之间存在的关系的全部情况，则高一级水平就能从各组成部分推导出来。因此，他（1987:85）说："为了理解组织的完整性，应当既认识各组成部分，也认识它们之间的关系。这里有一个根本困难，因为'常规科学'很不适应于研究系统中的'关系'。这种方法论之所以不成熟，原因之一是'系统'问题——古老的和很多世纪中为大家所知道的问题——仍然是'哲学'问题，而没有成为'科学'。这是由于缺乏数学技巧，这个问题也需要新的认识论。同时，'古典科学'的全部力量及其几个世纪以来所取得的大量成就，竭力反对改变它考察单线因果关系和把研究对象分解成简单的组成部分的那种基本'规范'。"

维纳也是20世纪最早一批从事复杂性科学研究的哲人科学家，他也是从批判传统的还原论开始来提出他的控制论思想的，并运用机体论思想揭示自动机与生命体在有关通讯、控制和统计学等一系列核心问题之间的本质上的统一，及其对复杂性科学的探索和对世界的思考。从20世纪以来，随着科学研究对象的日趋复杂化、多样化和组织化，机械论的思维方式被推到

了彻底变革的前夜。维纳以他特有的与时代科学潮流一致的科学精神，率先喊出了"寻找新的科学工具"的口号。这呼喊就像古代亚里士多德的《工具论》和近代培根的《新工具》一样，对人类的科学认识产生了重大影响。为了研究控制和组织的新理论，维纳在通讯领域里找到了他所需要的工具。他站在科学哲学的高度，深刻地揭示了自动控制系统与生物机体在控制机理上的相似性，把生物有机体看作理解自动机的模型，用广义的机体概念作为解释整个世界的基础，把钟表的世界转变为一个巨大的有机体，用机体论取代了机械论，变革了传统的科学思维方式。

维纳运用机体论思想冲决机械论，首先是在时间观念上突破的。时间，无论是对经典力学还是对控制论，都是极为重要的。绝对时空观是经典力学大厦的基础。牛顿认为绝对的真实的和数学的时间，由其特性决定，自身均匀地流逝，与一切外在事物无关，又名延续。牛顿时间的最重要的特点是它的可逆性。根据这种绝对时间，世界上没有本质上是新的事物。因为它把未来看成蕴涵在过去当中，当然不含什么新事物。正如维纳所说，在一个一切都是必然，没有什么偶然的世界里，不可能得出一个有意义的组织观念。维纳极为敏锐地抓住时间问题。《控制论》(1962:30)第一章就是"牛顿时间和柏格森时间"。他揭示，没有一门科学完全符合于严格的牛顿式样。牛顿天体力学看起来时间可逆，其原因主要是以太阳系为中心的天文系统只包括数目比较少而大小又极为悬殊的一些质点，这些质点之间的联系十分松弛，以致第二次的耦合效应不会影响我们观测的基本情况，而更高层次的耦合效应则可以全部略去。维纳进一步分析，即使在时间完全可逆的牛顿系统中，当回答几率和预测问题时也要发生过去和未来之间不对称的情况，因为这类问题本身就是不对称的。从物理学转向生物学，维纳用达尔文的进化思想给牛顿的时间可逆性以无可辩驳的批判。

复杂性科学第二阶段自组织理论的创立者们也是从批判还原论开始创立他们的新理论的。普利高津在为其著作《从混沌到有序》的中译本写的序中说："科学还处在它的初始时期，而且在历史上科学是被嵌在十七世纪的文化之中的，尽管这种嵌入富有成果，但是太受限制，以致对我们今天与自然的对话所引起的问题和疑问无法给出某种解释来。……西方科学因为把自然描述成一个自动机而造成了文化危机，这个自动机不能给出过去与未来之间的任何内在差别。"(1987:2)普利高津认为西方科学的基本信念是还原论，"相信在某个层次上世界是简单的，且为一些时间可逆的基本定律所支配"(1987:2)。他对这种观点持批判的态度，他说："今天看来，这是一种过分的简单化。我们可以把它比作是把一些建筑物归结为几堆砖。然而用

同一些砖,我们可以建成一座工厂,一座宫殿,或一座教堂。”“我们发现我们自己处在一个可逆性和决定性只适用于有限的简单情况,而不可逆和随机性却占统治地位的世界之中。”(1987:2)他在批判还原论的基础上,提出了不可逆的时间观和著名的耗散结构理论,并因此获得了诺贝尔奖。

协同学的创始人哈肯对还原论也持批判的态度,认为西方科学的一味分解、还原虽然重要,但不能解决所有的问题,需要向中国的传统文化的整体观学习借鉴。他(哈肯,2001:5)说:

西方科学“一种流行而往往有效的方法是把研究对象分解为越来越小的部分。物理学家把晶体分解为原子,又把原子分解为更小的粒子,即原子核和电子。……科学本身也已分为形形色色的分支:数学、物理学、化学,乃至社会学和心理学等。

然而,采用这种方法的研究者,其体验可能很像得到一辆玩具汽车的孩子。小孩很快想知道汽车为什么会跑,就把它拆成各个零件。一般来说,这是他不难做到的。但我们往往看到他坐在一摊部件面前哭鼻子,因为他还是不清楚汽车怎么会跑的,他也没法将那些零件重新拼装成一个有点意义的整体。”

正因为依靠分解还原难于理解大自然构成的奥秘,于是他提出要重视组成部件之间的关系和合作,并提出了著名的“协同学”理论。

在复杂性科学的第三阶段,复杂性的奠基者们也是从批判还原论来引出他们的新主张。美国圣菲研究所成立的目的就是要打破传统的学科分类和界线,走出还原论的窠臼,探索一条适合复杂性科学的新道路,构建超越还原论的科学研究纲领。正因如此,当受益于还原论科学的三位诺贝尔奖金获得者最早加入圣菲研究所时,立即在学界引起了震动,被称为“老帅倒戈”。其实,这三位诺贝尔奖金获得者虽然得益于还原论纲领,但他们作为“围城”中人,他们对还原论的局限也更有深刻的切身体会,所以他们才勇敢地站出来,成了圣菲研究所的最早支持者和缔造者。圣菲研究所的发起人和第一任所长考温说:“传统的还原论的思维已经走进了死胡同,甚至就连一些核心物理学家也开始对忽视现实世界复杂性的数学式的抽象感到厌烦。他们好像正在有意无意地探索某种新的方法。在这个过程中,他们正在以他们过去这些年,甚至这几个世纪都从未有过的方式跨越传统的界线。”(沃尔德罗普,1998:74)“在花了三百年的时间把所有的东西拆解成分子、原子、核子和夸克后,他们最终像是在开始把这个程序重新颠倒过来。他们开始研究这些东西是如何融合在一起,形成一个复杂的整体,而不再去

把它们拆解为尽可能简单的东西来分析。”（沃尔德罗普，1998：74）

凝聚态物理学家、诺贝尔奖获得者安德森（Anderson，P.）就是因为认识到还原论的局限，受到圣菲研究所在扭转还原论的潮流上所作努力的感召，才加盟圣菲研究所的。他首先承认，还原论的形式有其“哲学的正确性”，也就是：相信宇宙是受自然法则支配的。绝大多数科学家全心全意地认同这个论断。确实，如果科学家不接受这个观点的话，很难想像还会有科学的存在。相信自然法则就是相信宇宙最终可以被完全理解。能够决定银河命运的力量也就是能够决定地球上从树上落到地上的那只苹果的力量；能够透过钻石折射光线的原子也就是能够形成一个活细胞的原子；由大爆炸形成的电子、中子和质子也可以形成人脑、心智和灵魂。相信自然法则，就是从最深层次相信自然的统一性。但是，相信自然法则并不意味着基本法则和基本粒子是唯一值得研究的对象。即，只要有一个足够巨大的计算机，其他一切事情都是可以预料的这一观点。他说，很多科学家确实是这么认为的。正如他在1972年的文章中所写的：“具有将所有东西都还原到最简单的基本规律的能力，并不意味具有能从这些最简单的基本规律着手重构宇宙的能力。事实上，基本粒子物理学家越多地告诉我们基本法则的实质，这些法则对于其他科学的真正问题就越不相干，离社会现实就更为遥远。”（沃尔德罗普，1998：103-104）

复杂性科学研究专家、圣塔费研究所的布赖恩·阿瑟（Brian Arthur）在谈到还原论时说，行星时钟般规律的运动成为十八世纪的比喻：简单的有规律的可预测的和能够自我运行的牛顿式的机器。这个后来主宰了两个半世纪的还原论科学变成了牛顿式物理学。“还原论科学会说：‘嘿，这个世界既复杂又混乱。但是你看，只要有这两三条规则就能把所有这一切还原成简单无比的系统！’”（沃尔德罗普，1998：460-461）阿瑟指出，复杂性科学的革命，从某种意义上说，“是针对还原论而来的。”（沃尔德罗普，1998：462）

霍兰虽然对还原论的态度要缓和一些，甚至充分肯定还原论的功绩。但是，正是这个表面缓和的学者，充分看清了传统科学的缺陷：它们都是研究被动消极的对象，并把对象和环境完全隔离。他把“主动性”和“适应性”引入科学之中，把研究对象当作具有各自思想的“主体”，并以此为突破口建立了他的“复杂适应系统理论”和“涌现理论”，他从正面建设的角度给了还原论一个真正的打击。

总之，复杂性的研究者们一个共同的特点就是都感受到了还原论的局限，都从批判还原论入手来提出、展开自己的新主张，都把超越还原论当作自己的首要任务。

四、复杂性科学对还原论的超越

复杂性科学不能按照还原论的研究纲领来进行，而是要求超越还原论，提出自己的新纲领。作为复杂性的一个重要研究方向，当下极有必要对超越还原论进行深入的思考：什么是超越？抛弃还是扬弃？我们要采取怎样的态度和方法来超越？

还原论的分析观，是一种只见树木不见森林的片面观点。它对于科学发展的一定时期，对于科学的进步来说，是完全必要的，甚至是必不可少的。这样做时，可以使人们关于对象的知识得以深入。但是，当科学的知识积累起来，当人们的认识由一个个点发展到需要进一步弄清这些点之间的联系，需要把个别的知识综合起来，还原论纲领的局限性就明显起来。复杂性科学的兴起，是与克服这样的片面性相联系的。也正是在这个意义上，复杂性范式的形成就代表了科学研究范式的一种转变，超越还原论也就成为一种必然的趋势（Schank，2001：33-40）。

最早明确提出复杂性科学是“超越还原论”的这一观点的是美国《科学》杂志 1999 年 4 月 2 日出版的复杂性专辑。在这个专辑里，两位编者 Richard Gallagher 和 Tim Appenzeller 在其以“超越还原论”为标题的导言中，对他们所指的“复杂系统”做了如下简单的描述：通过对一个系统的子系统的了解，不能对系统的性质作出完全的解释，这样的系统称为复杂系统。用通俗一点的说法，对于复杂系统，整体的性质不等于部分性质之和，即整体与部分之间的关系不是一种线性关系。这一说法虽然很简单，但在科学方法论方面却引起了人们的注意与反思，也就是对处理与解决复杂系统有关问题，几百年以来科技界所用的还原论方法有所不足，还需要补充新的方法。他们在文章中说，在西方科学中，“占支配地位的是还原论：物理化学中的问题可以根据原子物理学来理解，细胞生物学根据原生质如何起作用，生物体根据构成它们的细胞系统的相互作用。”“自从西方科学的黎明以来它就是获得有用信息的关键，而且已经通过科学家及其他深深地植入我们的文化之中”。他们也很清楚，“还原论的不足之处正日益明显”，“所以用一系列整体论的讨论来补充主流的还原论也许会有所裨益”。从此，复杂性科学是超越还原论的科学就成为一种流行的口号。

现在的问题是，我们怎样来理解“超越”？我们把“超越”常常理解为抛弃，也就是把原来的东西扔掉，完全采用新的东西。例如，我们说复杂性科学是对还原论的超越，就认为还原论一无是处，是复杂性科学的绊脚石，只有彻底与还原论决裂，完全采用整体论的方法，我们才能对复杂系统进行研

究。在中文中,“超越”是“跃过、越过”的意思。然而,在西方哲学中,超越的意思是对原来的东西作出某种限制。哲学家张世英认为,“超越、扬弃不是绝对否定和抛弃,而是经过它又超越它。”(张世英,2004:9)他在其《新哲学讲演录》中反复讲到各种超越的问题,例如纵向超越与横向超越,两种超越的途径,超越自我以及超越之路等等。刘放桐(2000:8)曾经对“超越”做过一段精辟的论述:

> “‘超越’(英德语动词分别为 transcend, transzendieren;名词分别为 transcendence, transzendenz)是西方哲学论著中常用的概念之一,它在不同语境下,在不同哲学家那里含义往往有所不同,超越当然包含着对超越的东西的某种否定,但只有个别极端的虚无主义者(例如极端的当代后现代主义者)把这种否定绝对化。在大多数西方哲学家那里,超越只意味着超出某种限制,并无全盘否定之意。有的哲学家甚至还通过超越或类似的概念来肯定在有本质区别的新旧事物之间存在着连续和发展。”

黑格尔(1977:98)在《逻辑学》中指出:“扬弃在语言中有双重意义,它既意谓保存、保持,又意谓停止、终结……所以,被扬弃的东西同时即是被保存的东西,只是失去了直接性而已,但它并不因此而化为无。”

人们喜欢把一个东西普遍化、绝对化,把它说成放之四海而皆准的绝对真理,例如牛顿力学原来就被认为是这样的理论,没有适用的边界。然而,任何理论和学说都有自己的边界条件,只是当时没有被发现罢了。相对论和量子力学的提出,就对牛顿力学作出了限制,找到了牛顿力学适用的边界条件:在高速和微观的状态下牛顿力学都不适用,它只适合宏观低速的情况。但是,相对论和量子力学并没有完全推翻牛顿力学,更没有声称要完全抛弃它,只是对它的适用范围做了限制。这就是相对论和量子力学对牛顿力学的超越。哲学要寻求一般性,可是,不计后果的推广是哲学中的一个通病,正如康德所沉痛地解释的那样。概念和观点一般都有一个明确的有效范围,超过这个范围的推广经常会带来错觉。当一些修正哲学注意到还原论在研究简单系统时是成功的,把它推广到所有系统的研究中时,就出现了这种错觉。

按照这样对“超越”的理解,复杂性对还原论的超越是什么意思呢?应该说,就像我们刚才在对还原论的评价里所说,如果从方法论的意义上来理解的话,还原论并非一无是处,它在上千年特别是最近数百年的科学实践中被证明是立下了汗马功劳,近现代科学离不开还原论。最新的科学进展也

证明,诺贝尔奖获得者的科学贡献大部分还是归功于还原论,可见复杂性科学要完全否定和抛弃还原论是不可能的,除非复杂性科学不想纳入现代科学的大家庭。复杂性科学必须包容还原论方法,而不是排斥它。之所以会产生复杂性科学与还原论誓不两立的印象,主要是复杂性科学的先驱们为了树立复杂性科学自己的科学地位而过分强调了它与传统科学的差别。苗东升(2005:2-3)认为,"通过揭露还原论和分析思维的局限性来宣传建立系统论的必要性,阐述系统思维的基本内涵,是贝塔朗菲以来历代系统理论家的惯用做法。历史地看,这样做是完全必要的、不可避免的和合理的,但也带来某些片面性,似乎还原论科学对系统思维的兴起只有反面的激励作用,没有任何正面贡献,以至有人声称系统思维的产生源于科学的失败。"复杂性科学和系统论思想同根同源,所以,他对系统论研究和还原论关系的评论也适用于复杂性科学与还原论的关系。

复杂性科学如果完全排斥还原论和由此派生出来的分析方法,那么对象系统就只能保持着一个原始的完整性,保持着原来的黑箱系统。虽然现代科学与技术已有一定的手段在不打开黑箱的情况下也可以研究黑箱系统,但最好的办法还是能够真正打开黑箱,对复杂系统进行分解,对分解后的部分进行分析。对部分的分析虽然不一定就会对分析整体有帮助,但不分析部分要对整体进行分析更不行。假定对象系统为一片森林,你的任务是保护它,或开发利用它,或二者兼而有之。一定的森林依托一定的山水地形,不同的森林中树木的种类、分布和发育状况亦不同;森林是生态系统,林中的奇花异草、飞禽走兽、枯枝败叶等等,都是它的组成部分。如果你不深入进去了解这一切,仅仅停留于直观的整体把握,即绕着它的周边从外部整体地观察,或者在飞机上整体地鸟瞰,凭借这样得到的知识去行动,那你既无法保护它,也无法正确地开发利用它。正如苗东升(2005:2-3)所说,"只见树木,不见森林"固然不行,"只见森林,不见树木"同样不行,两者都不是正确的方法。现代人在实践中打交道的对象几乎都是这类系统,如果仍然像古代人那样只重视用整体思维识物想事,满足于"只见森林,不见树木",将无所作为。没有经过分析思维洗礼的原始的整体方法建立在思维活动的思辨之上,不追求思维过程的可操作性,基本属于经验性思维方式,思维能力来自实践经验的磨练。复杂性科学属于科学思维方式,强调思维的可操作性,需要通过学习科学和自觉修炼才能建立起来。

前面我们说过,本体论上的还原论包含无演化性、可分解性、线性因果关系、叠加原理等基本主张,并由此导出了简单性的世界观。而复杂系统是具有:①不可预测性;②连通性;③非集中控制性;④不可分解性;⑤奇异性;

⑥不稳定性；⑦不可计算性；⑧涌现性等特性的系统，这样面对复杂系统，还原论就在许多方面显得无能为力。

首先，还原论的思维是一种线性思维。传统科学在还原论的指导下，都假定其研究对象各种关系都呈线性关系，这种关系处理起来的确简单，然而在现实世界中却是一种理想化的关系。在现实世界的各种关系中，绝大多数都是呈非线性关系。这一点其实传统科学时期也被早已知道，只是那时没有合适的处理工具，对非线性关系还难于把握，所以以前都是把非线性关系进行线性化，把非线性关系当作线性关系的近似。只有在符合线性关系的情况下，各种关系的还原还能够真正实现，才能够不丢失重要信息。在复杂系统中，其基本关系是非线性关系，而且这些非线性还不能线性化，否则就不能反映真实。因此，由于非线性关系的存在，在面对复杂性时，还原论就不是一种理想的方法论，必须寻找到适合新情况的方法论。

其次，运用还原论方法进行还原分解之时，我们总是假定系统是可以进行无限分解的，但是在复杂系统中，这种分解难于进行到底。我们在对系统进行分解之时，只是保留和抓住了一些自认为主要的东西，而把许许多多认为次要的东西丢失了。在线性关系之时，小的原因引起的结果也会很少。然而在复杂系统中，由于非线性的存在，小的原因会引起大的后果，这就是著名的“蝴蝶效应”。所以，在复杂系统中，分解还原并不总是能够进行。在不能进行的时候，强行还原的结果将造成面目全非。

再次，传统的科学一般都是存在性的科学，时间在这些科学中都是一种外在的关系，过去和现在没有明显的区别，各种因素不会随时间而变化。但是，在复杂系统中，我们面对的一般都是时间的参量，都存在生成演化的关系。正因为这样，普利高津认为现代科学的发展趋向是从存在到演化。在复杂系统中，各种变量存在着复杂的相互关联。由于它们的相互作用，将出现我们在线性系统中难于想像的新现象，这也就是复杂系统的涌现现象。还原论所处理的一般是没有新质产生的系统，面对不断有新现象涌现的复杂关系，分解还原将无法处理，强行分解还原将不能产生和解释真正的涌现。这样，我们不得不突破还原论的思维框架，寻找着从整体和生成演化的框架下解决问题的方法。

最后，在传统科学中，我们要排除作为主体的人的参与，在主体和客体之间要保持一定的距离，才能保证所谓的客观性的存在。这里的组元都是简单被动的，没有思想、没有主动，只是任凭我们处置的客观对象。但是，在复杂系统中，其构成要素却往往都是有主体的参与，主体和客体存在耦合关系。例如，在经济系统中，各种经济组织都是由人组成的，都有自己的意图

和目的,并不简单被动。在政治组织中,各种政治团体和个人也都各有想法,并且主动参与系统中的各种活动,并对系统的整体行为产生重要的影响。这些都是霍兰所说的复杂适应系统。面对主体参与、主动适应的系统,还原论的方法都无能为力,甚至认为这些都不是科学要处理的事情。在还原论关照下的传统科学观把这些主体参与的系统由于缺乏纯客观性或者说“可证伪性”而被列入非科学的行列,甚至被打入伪科学的冷宫。但是,复杂适应系统又是普遍存在的系统,我们不得不去面对和处理,我们只能说,我们的还原论还存在缺陷,在处理复杂系统时我们一定要超越还原论的思维框架,创造出适合复杂系统的新的方法论纲领。

分析的思想和还原的方法由于在数百年来的成功,在科学研究中取得了绝对主导的地位,并让我们形成了这样一种观念:当我们认识一个复杂的事物时,我们首先将这个事物依据某种原则分成多个小的组成部分,然后进一步将这些组成部分分成更小的子组成部分,直至知道能对这些更小的组成部分进行严格而又透彻的分析为止。一般认为如果将这些小的组成部分全部认识清楚,意味着我们已经完全理解了整个系统。正因为数百年来还原方法在各个学科中的成功应用,使得人们产生了还原方法是万能方法的错觉,就像牛顿力学当年被认为是万能理论一样。因此,还原论或者说还原方法就走过了头:近现代科学在取得巨大成就的同时,把还原论当成了唯一科学的方法论,把分析思维当成了唯一科学的思维方式,全盘否定整体思维的价值,从而走向了一个极端。其实,任何理论或方法都具有自己的边界条件。找到自己的边界,定准自己的位置,并不是意味着被彻底否定,而是回归到自己应有的地位。还原论在近现代科学中就是一种被无限夸大了的科学方法。这种方法本身并没有过错,过错的是我们把它无限夸大到了不适当的地位。对还原论的超越也就是要对还原论作出某种限制,也就是对原来认为宽大无边的可以处处使用的还原论找到适用的边界条件,让还原论处于自己的合适地位。

那么,复杂性科学是如何超越还原论的呢?用苗东升(1996)的话来说,就是要“把复杂性当作复杂性来处理”。具体方案如下:

(1)把非线性当作非线性处理。经典的简单性科学包含许多非线性问题,但其处理办法是把问题线性化,用线性模型近似代表非线性的原型,这就是把非线性当作线性来处理。线性化无疑把问题大大简化了,但同时也就把非线性产生的许多非平庸特性(如自激振荡、分岔、突变、混沌等)给简化掉了,当对象具有强非线性、特别是本质非线性时,系统研究真正关心的恰是这些非平庸特性,线性化处理无法保留这些非平庸特性,失去实际系统

具有的本质特征。必须采取全新的简化方法，在保留非线性的前提下寻找描述非线性的简化方法；非线性科学就是把非线性当作非线性来研究的科学，也必须在把非线性当作非线性的前提下进行必要的简化处理。

（2）把远离平衡态当作远离平衡态处理。经典科学视平衡态为系统的唯一正常状态，把非平衡态理解为干扰因素造成的非正常状态，力求将平衡态下获得的结论线性地推广于非平衡态。但普利高津发现，系统在平衡态及其附近只能表现出简单的平庸行为，在离开平衡态足够远时才能够表现出各种非平庸的复杂行为。他率先突破平衡态物理学观点的束缚，把远离平衡态当作远离平衡态处理，创立了耗散结构论，予自组织现象以深刻的理论说明。

（3）把混沌当作混沌处理。简单性研究认为系统的定态只可能是平衡态或周期态，把非周期运动视为一种过渡态，随着系统逼近定态就会逐步消失。由于这种观念的束缚，尽管19世纪中叶以来的科学家不断接触到混沌现象，却总是把它们当作随机噪声。混沌学家的非凡之处在于率先摆脱这种传统见解，摒弃了把混沌性简化为非混沌性来处理的惯用方法，承认确定性系统可能内在地产生出随机性，非周期运动也可能是系统的一种定态，并着手建立描述这种奇异行为的新理论。把混沌运动固有的不规则性、复杂性当作表面现象忽略掉，简化为规则的周期运动，或者当作随机扰动，是经典科学的方法论原则。其结果是把一般非线性系统固有的混沌运动人为地排除掉。从描述系统行为的非周期性入手，把混沌当作混沌来处理，是混沌学的方法论原则。

（4）把分形当作分形处理。分形有两个基本特征，一是粗糙性（不规则性），二是自相似性（部分与整体相似）。按照经典科学的方法处理，就是选定一个适当的尺度，把小于这个尺度的一切曲折性、不规则性忽略掉，化复杂的分形图形为至少是分段光滑的规整图形。这样做固然大大简化了问题，同时也就人为地消除了它固有的粗糙性和自相似性。芒德布罗反其道而行之，把粗糙性和自相似性当作这类对象的本质特征对待，即把分形当作分形来描述，创立了全新的分形几何学及其方法论。

非线性、远离平衡、混沌、分形都是复杂性的某种表现。把非线性当作对线性的偏离，把远离平衡态当作对平衡态的扰动，把混沌当作复杂的规则运动，把分形当作复杂的规整图形，都是把复杂性当作简单性来处理，结果只能是失败的。把非线性当作非线性，把远离平衡态当作远离平衡态，把混沌当作混沌，把分形当作分形，把模糊性当作模糊性，都是把复杂性当作复杂性来处理，都带来科学的重大进步。系统产生复杂性的根源多种多样，如

开放性、不可逆性、不可积性、动力学特性、智能性、人的理性和非理性等。在每一种情形下都有两种截然不同的简化处理方式，只有在保留这些因素的前提下进行简化，即把复杂性当作复杂性处理，才是复杂系统理论所要求的简化。

非线性、远离平衡、混沌、分形、模糊性在简单巨系统中都可能出现，对这些复杂性的处理仍然有路可寻，因而还不是最高层次的复杂性。生命、社会、思维等领域的复杂性，通常出现在复杂巨系统中，要比上述几种复杂得多，研究它们尤其需要实行把复杂性当作复杂性处理的方法论原则。坚持这个原则首先遇到的是方法论问题。对于这类系统，用还原论方法来处理是不行的，仅用整体论方法也不行，因为从可观测的整个系统到子系统层次很多，中间的层次又不完全清楚，甚至有几个层次都无法确定，即使各个层次都清楚了，整个系统功能也不等于子系统功能的简单叠加，现有科学方法宝库中还没有适当的武器。

五、复杂性科学对还原论的包容

复杂性科学工作者希望在方法论中做革新，以便弥补传统科学难于胜任的一些理论建构，于是提出了超越还原论的主张。但是，他们并没有宣称过要与还原论决裂，更没有说要抛弃还原论。苗东升(2005:2-3)说系统思维并不排斥分析思维，其实复杂性科学也不排斥还原论和分析方法。

复杂性科学的先驱者们自己虽然强烈反对还原论方法，但他们自己却从来都没有真正离开过还原论。例如，对还原论批判最激烈的贝塔朗菲仍然用微分方程组定义他的一般系统，而以微分方程组作为数学模型正是分析科学的一大创造。他(1987:22)还曾坦言：

> 在“系统方法”中既有机械论的倾向和模型，又有机体论的倾向和模型。前者企图通过“分析”、“线性(包括循环)因果论”、“自动机”来掌握系统，后者则通过“整体性”、“相互作用”、“动态学”(或任何其他可用以规定二者之间区别的词)来掌握系统。

事实上，所有具体科学层次上的系统理论，如控制论、运筹学、系统动力学、耗散结构论、协同学、混沌理论等，以及后来的复杂适应系统理论等，都在大量使用分析科学创造的数学工具，特别是各种数学方程；所有著名系统科学家不仅不拒斥分析思维，而且力求从分析科学中寻找可用工具，有人甚至主张像物理学那样把系统科学公理化、定量化、精确化。这都启示我们，要深刻了解系统论和系统思维，须深入考察还原论和分析思维。相反，一些

没有真正做过复杂性科学的人特别是从事复杂性哲学的学者,反而认为复杂性科学是一门全新的科学,与其研究的方法论也必须做彻底的决裂和革新,否则就不能表现复杂性科学的革命性。北京大学孙小礼(1993:110)说得好:“在科学研究中一味地追求简单,把复杂性等同于简单性,把复杂系统等同于简单系统,这是十分错误的,必须加以反对。但是,……在以复杂系统作为研究对象的系统科学方法中,简化原则仍然是重要的方法论原则,在系统方法中是不可能放弃简化这种处理方法的,而且还要创造性地发扬简化原则的认识功能。”

在复杂性科学中,美国圣菲研究所的霍兰算是一位重要的开拓者。他最早创立了遗传算法,并在此基础上建立了他的复杂适应系统理论和探索复杂系统涌现规律的涌现理论等复杂性科学的重要理论分支。他在探索复杂性时,其实并没有把复杂性科学和还原论对立起来,相反,他很重视还原论,在其理论的建立过程中大量使用还原方法,并认为只有找到复杂性产生的基本机制,找到涌现的基本规律,复杂性科学才真正纳入了科学的体系。他在其专著《涌现》(2001:203-218)一书中的第十章,还专门探讨了层次描述和还原方法,对还原论在复杂性科学中的应用做了详细的探讨。在建立涌现理论时,霍兰就把涌现看成是一个受限生成过程。他也大量使用模型特别是计算机模型,并用分析的方法对游戏、西洋跳棋、神经网络等系统做了案例研究。他一方面注意到还原方法的局限,在建立模型之前和过程中,时时不忘整体系统的存在,另一方面他又要将这些现象最终能够采用分析还原的方法建立起理论体系,甚至最好能够建立起公理化体系。他说:“复杂性产生于一些由经过适当选择的规则所定义的系统。因而当观察涌现现象时我们应致力于发现产生涌现现象的规则。运用前面形成的特殊表达方法,关键是需要找到产生涌现现象的受限生成过程。通过这一过程,就能够把对涌现的繁杂的观测还原为一些简单机制的相互作用。”(霍兰,2001:203-218)他在最后一章也希望找到产生涌现现象的基本概念和基本规律,让复杂性理论也像物理、化学等传统的科学一样,具有严格的逻辑体系。缺少了还原论和分析方法所建立起来的科学的基本要求,复杂性科学就不可能被科学接纳,永远也不可能真正成为科学理论。

复杂性理论如果要纳入科学的范畴,它就必须有自己的逻辑演绎体系,要有自己的基本概念和基本理论,而且学科内部的理论之间也可以实现还原。虽然在复杂性科学中并不要求所有的问题的解释都必须直接用物理学定律表达出来,但它的理论还是需要经过还原论的洗礼,在其内部要能够建立其逻辑推导关系。霍兰(2001:204-205)说:“即便是在国际象棋或康韦自

动机这样的模型里，尽管规则十分明确和简单，许多观测的结果仍然被一些数量巨大的现象所决定，如国际象棋彼此合作的卒的排列或滑翔机过程。除非我们能够明确表述宏观规律，并用它描述这些现象，否则要想对所有可能发生的情况进行分类将是极为困难的。此外，由于绝大多数规模庞大的现象是涌现出来的，它们所赖以生成的相互作用大于局部作用的总和，这时我们遇到的困难将会更大。”

由此看来，复杂性理论研究中，我们仍然要使用还原方法，复杂性理论之间的各种规律也要有理论还原的关系。因为存在着涌现现象，还原方法又不能充分表达这些更加复杂的理论关系，所以复杂性科学要超越还原论。当我们能够明确表示出“宏观规律”，并用以描述这些涌现现象的行为（如化学成键的规律）时，那么不论是在模型领域还是在真实世界中，我们在对问题的理解上都会获益匪浅。霍兰就是这样描述康韦自动机中的“滑翔机”：沿着对角线方向匀速运动，并且不存在“阻力”。尽管我们知道，这种涌现出来的“滑翔机”的行为可以归纳为定义自动机的一些简单规律，通过这种“宏观规律'，我们仍能获得对这个领域真实的认识。同样地，我们发现，真实世界中各种物质在没有“外力”的干涉下按照一定的规律运动，这样我们便认识了宇宙运动的实质。对这些情况进行归纳后，便可以猜想：我们观测到的种种复杂行为，都可以还原为一组“定义”宇宙的简单规律——物理学定律。不论是康韦自动机还是真实世界中的一些过程，我们都不期望所观测的涌现现象能够根据基本规律进行简单的描述。实际上，在模型和真实世界这两种情形下，我们更热衷于寻找“宏观规律”的简化方法（霍兰，2001：204-205）。

可以将这些“宏观规律”视为那些加入到初始公理（定义模型的规律）中的其他公理。通常，这些附加的公理往往具有某些前提以挑选出一定范围的系统状态，这些状态要么经常出现，要么有可能使系统向其他方向发展。整个系统仍然受到初始公理的限制。霍兰（2001：205）在刻画涌现机理时，设法用“如果[新公理]，则[引论]”的方法进行描述，并说：“原则上我们能够根据这些初始公理推出一切结论”。“系统中存在着许多可能条件（宏观规律），而关键在于从中挑选出最合适的条件，这些合适条件不能很明显地从对初始公理的直接检验中得到，但它们描述了系统可能出现的状况。”（2001：205）他认为，这个时候还原论方法就显得难于对付，需要隐喻和跨学科比较的方法，这两种方法是发现这些条件的关键。他还总结了还原的本质：“当我们观察规律性时，经常把描述‘提高一个层次’，以替换那些从初始原理中实现起来可能会困难，甚至无法实现的计算。这些规则仍然满足基

本微观规律的约束,但通常包括一些附加的假设。在附加的假设下,这些规则得以继续下去,我们则可以使用一种更加简单的'衍生'的动力学。通常还可以使用一些短语,像'常规'的或'自然'的条件,来描述附加的假设。当这些条件不存在时,我们便放弃宏观层次而转向微观层次,以根据需要对问题进行更加细化的考虑。"(霍兰,2001:217)

强还原论一般认为,任何学科的概念和理论都可以最终还原为力学的语言,力学是一切学科的基础,是学科生长的始基。也就是说,强还原论不但承认学科之内可以实现还原,而且学科之间也必须实现还原,所有学科最终都还原到物理学特别是力学中去。这种强还原论当然是难于实现的,在实践中也越来越受到人们的责难。而弱还原论则只承认世界是可以通过基本规律来解释,整体可以分解为部分,但部分的堆砌物不再是原来的整体,其方法是从上而下的分解与自下而上的综合。弱还原论承认任何学科都有自己的一个逻辑基础,纷繁复杂的现象和规律可以做分析还原的工作,找到一些基本的概念和理论,找到学科的逻辑生长点。但是,并不是所有的学科都从物理学,特别是力学中繁衍出来的,并不是所有的学科都可以还原到物理学特别是力学中去。也就是说弱还原论承认,虽然不一定完全能够实现学科之间的还原,但学科之内是可以还原的。从这个意义上来说,任何学科包括现在的复杂性科学,都难于离开还原论。那种认为还原论除了趋于衰落之外,已不再有任何积极的意义,复杂性科学研究与还原论誓不两立,复杂性科学必须抛弃还原论等观点是一种过于简单的看法。相反,还原论在原则和渊源方面,有着更为深刻更为丰富得多的东西。它所强调的构造性学科体系和可控实验的传统,特别是它的方法论基本原则,不但曾经在近代科学的发展中大显身手,而且在复杂性科学研究中必然要被遵循。离开还原论,复杂性科学研究就可能走上神秘之路,不可能真正成为科学大家庭中的一员。

总之,"超越还原"不是以本体论革命的名义抛弃一切分析方法和还原原则;不是以自然观的演进来证明方法论革命的必然。自然观的改变和方法论的超越是两个层面的非同构问题。在本体论层面,我们还可以在一个较强的意义上强调超越的决裂性;在方法论层面,我们则应该在一个较弱的意义上理解超越,以一种充分开放和扬弃的态度吸取已有还原、分析方法的合理性,以系统、整体的观念"在关节处切割自然"(欧阳莹之,2002:90),而不是妄图彻底抛弃"分割"和"构成"。"在复杂性研究的促动下,方法论意义上的简单性也受到挑战,其中的还原论方法不再具有普适性。但是,作为

科学抽象和合理近似的简化方法，则经受考验，仍然具有普遍性。”（孙小礼，1993：181）

第二节 复杂性科学与整体论

复杂性科学在反对还原论或者说在超越还原论的同时，提出复杂性科学是一种整体论的研究，是整体论的研究纲领。复杂性科学与整体论究竟是怎样的关系？复杂性科学就是关于整体论的研究吗？

一、整体论的含义及其演变

（一）整体论的演变

“整体论”（holism）是一个非常古老观念的现代名称。学界一般认为，整体论是由南非国务活动家和哲学家斯穆茨（Smuts，J. C.）于1926年在《整体论和进化》（*Holism and Evolution*）中首次提出的（司马贺，2004：158）。但关于整体论观念的萌芽，早在几千年前甚至数万年前就出现了。那时由于人们实践能力较低、认识水平有限，只是非常朦胧地感到，是某种确实存在而又无法确认的外在神秘的东西在支配着一切。早期原始人还无法确定这个支配一切的力量能够被认识和掌握，他们用“肯定而不确证”的形式推动着原始宗教的产生发展，用他们特定的方式创造着辉煌的文化和文明。我们从中外古代人的太阳神崇拜、图腾崇拜、黄帝炎帝等的神话传说中，清楚地感到古人对客观整体力量的直觉性和强烈感受，它们反映出人类整体观的客观产生和自在追求。例如，古希腊神话中的诸神及其相互制约作用的关系就是现实实践中矛盾群运动（整体）各个主导力量的化身，“神殿”是现实各个具体整体运动场所的刻意描述；中国古代“龙”的无所不能和难以窥视其全貌表明，当时中国人对整体的感受是客观化的、真实的。人们在远古时代只是朴素地感知客观总画面的最一般性质，确定世界上的各种事物是互相联系和互相作用（所谓的“3”）（吴彤，黄欣荣，2005：6-11）、有变化的混沌之物（所谓的“1”）。这个混沌之物以神或图腾等面目出现，人们能确证其存在（感性化的），却无法控制它、认识它。

亚里士多德的著名论断："整体大于部分之和"清晰地体现着整体论思想，即在若干部分组成一个整体时，除了各部分自身的各种属性之外，还产生了新的质。在近代西方哲学中，斯宾诺莎率先考察了世界的整体性。文艺复兴以后，随着实践水平的提高，人们开始试图从科学上和理性上认识整体。这种努力的第一步是分化认识客观世界，这直接导致各门具体科学的产生和发展。人们对具体个别整体的认识日益清晰准确，个别具体整体的认识对人类实践活动的作用日益凸显。中外许多科学技术的成就就是这种对个别具体整体认识把握的结果。这从根本上提高了社会认识整体的水平和历史发展的步伐。然而，与之同时，这种对个别具体整体的分化认识也容易导致人们在认识和实践上的片面化、抽象化、绝对化。特别是关于整体的研究还处在自在的、不发达的时期。

论及整体论的初期发展，不能不提到一位学者：怀特海（White-head, A. N）。他指出，近代科学虽然极大改变了人类世界，但是这种科学过分倚重"物质"和"局部化"，只认定单纯的物质而忽略了价值的假定；假如变通一下，开始考虑价值和整体性，科学就不会终结（1991:198）。这表明了他对还原论的批评以及对整体论的认同。在《过程与实在》中，怀特海写到，宇宙万物之间存在着一个潜在的联系网，许多潜在的统一体成为了现实实在的统一体。20 世纪 50 年代，美国哲学家蒯因从分析哲学的角度对整体论有所发展，其思想与更早一些的比利时物理学家迪昂（Duhem. P）的观点非常一致，被合称为"迪昂—蒯因论题"。这一论题主要关注知识的整体主义。蒯因认为，任何一个陈述，哪怕是经验陈述都不可以独立为真。人们的观察材料不能用来单个地检验科学假设，而只能检验科学假设的整个体系。蒯因的结论是，经验证实或证伪的是一个整体而不是单个的假设。这一结论后来招致了广泛的驳斥，批评者说蒯因将整体论无限泛化，造成了整体论的极端化。

整体论的进一步发展是与还原论的分庭抗礼紧密相连的。还原论主张用分析的眼光对待世界，认为整体等于部分之和，应当把整体分解为部分，然后再分别加以研究，以便从部分的性质推导出整体的性质。应该说，现代科学能取得如此大的成就，还原论功不可没。然而，随着科学的发展，特别是有机化学和生物学的发展，人们注意到整体的性质往往难以完全从组成部分中推导出来。斯穆茨之后，蒯因曾用整体论驳斥了还原论，更近一些的美国生物学家迈尔（Mayr, E. W.）也明确反对还原论，提倡整体论。迈尔认为，还原论主张要认识了解整体就必须将之分解为部分，而且还要进一步将这些组成部分再分解为更微小的组成部分，一直到等级结构的最低层次；然

而，等级结构较高层次的过程往往大多与较低层次的过程无关，因此极端的还原论是失败的，因为它对一个复杂系统的组成成分之间的相互作用未予重视。与此相反，整体论强调较高等级层次的单位大于其部分之和，因此将整体分解为组成部分总会遗留下尚未分解的残存物，即整体具有不可还原性。

（二）整体论的涵义及其分类

那么，究竟什么是整体论呢？斯穆茨（Smuts，J. C.）对此做了一个简单的解释。用他的话说：

> （整体论）视自然物为整体……它将自然界看作是由分立的、具体的物体或事物组成的……（这些事物）不能完全分解为部分；并且……大于其部分之和，将其组成部分机械堆积在一起并不能产生这些事物，也不能解释其性质和行为。（转引自：司马贺，2004：158）

他举例说，细胞内部存在一种协作机制，它可以使物体发挥出整体功能，这种协作机制就是整体性。他通过以下五个层次来说明整体性逐步深化的过程。首先是单纯的物理混合物，其中的各部分大都保持了固有的性质和作用。其次是化合物，其内部构造较为严密，而各组成部分的活动与作用完全受新构造的支配，不再保持原有的性质。再次是有机体，其生物构造更加严密，并且有了中枢神经的控制，使得各器官都受其支配并且协调运转。第四层是思维或心灵，这是有机规则和协调系统在更高层次上的延续，其中枢控制更加自觉，而且有极大的自由与创造力。第五层是人格，人格是进化序列中最高级的整体形式，是宇宙间整体运动的高潮阶段（culminating phase），同时它的整体性和复杂性也带来了最大的谜。总之，从简单无机物到心灵、人格，整体性在进化的过程中逐渐加深。可见，整体性并非人们头脑中想像之物，而是宇宙间的真实映象，体现了宇宙进化的动力和基本原理。为此，斯穆茨根据希腊文 holis 创造了一个新词 holism，来称呼这种宇宙的基本原理，整体论由此产生。

整体论是关于整体的理论或学说，它同还原论一样，也可分为四个层面：整体论既可是一种本体论，又可是一种认识论或知识论，还可是一种方法论（郭元林，2002：38）。金吾伦（2000：54）先生认为，“整体论的形式多种多样，归结起来可以分为以下八种：①机体论，②能体论，③系统整体论，④生态整体论，⑤全息整体论，⑥纠结整体论，⑦关系整体论，⑧辩证整体论。”其中，量子关联的纠结整体论和巴姆的整体论都是本体论意义的整体论。

量子关联的纠结整体论主要论述了世界是一个不可分的整体，且是由许多世界组成的，世界、实在从何而来等问题。巴姆（Bahm，A. L.）的整体论区分了三类整体，分析了七种关于整体与部分关系本质的理论，提出了一种更彻底的整体论——能体论，这些都是关于世界本体的论述。整体论作为一种认识论，研究如何认识整体的问题，机体论就包含有这方面的内容，它强调认识有机整体仅采用还原分解方法是不够的，对其组成部分无论认识得多么深刻和充分，但对有机整体的认识仍是不全面的；关于有机体的理论、定律等并不能从关于部分的理论、定律等中推导出来，用物理化学的规律并不能完全解释生物学的规律。

如果一种整体论是关于整体的知识的理论或学说，那么这种整体论就是一种知识论。例如，从关于部分的知识能否推导出关于整体的知识，从物理化学能否推导出关于生物学，关于整体的知识从何而来，都是知识论意义的整体论所要研究的问题。也有些人认为知识（特别是科学知识）是一个整体，迪昂认为科学理论是一个由命题和定律相互联系形成的整体；奎因认为，科学是由命题、定律、原理、学科组成的经纬交错的大网络或力场，这些命题、定律、原理、学科之间相互联系相互影响形成一个密不可分的整体；库恩（Kuhn，T.）认为科学理论是一个由范式统治着的整体，科学革命是范式的更迭，是科学理论整体的变化。这些关于知识的理论，即知识论，把知识当作一种本体来看待，把知识本体当作一个整体，这些知识整体论是知识本体论意义的整体论；它们不是知识论意义上的整体论，不研究关于整体的知识。这个区别是值得注意的。

整体论作为一种方法论，它是关于整体研究方法的理论、体系或学说。方法论的整体论要包括三个含义：首先，本体层面，存在整体；其次，认识层面，一些关于整体（或较高层次）的概念、定律、理论和学科既不能从关于部分（或较低层次）的概念、定律、理论和学科中推导出来，也不能从关于更大整体（或更高层次）的概念、定律、理论和学科中推导出来，认识整体无法仅通过认识部分或更大整体来完成；最后，方法层面，研究整体时不分解还原整体，要保持整体的完整性，利用观察、刺激反应、输入输出、模型、模拟、隐喻等整体研究方法。在把整体论作如此方法论界定之后，它的含义就清楚了。

在方法论方面，斯穆茨批评那种将具体事物分割成细小的元素进行分析的方法，从中可以看出他对还原论的态度。他对机械主义的研究方法同样持一种批评态度，认为这种方法只见局部不见整体。在整体与部分的关系方面，斯穆茨虽然强调整体性，但他并不否认部分的作用。他承认自然界

中的“整体”(wholes)都是由部分构成的,但整体并不是各部分的简单相加,而是各个部分以一种确定的结构联系在一起并不断互动构成的。并且当整体性产生时,各部分的性质也会发生变化。

整体论所研究的客观世界是一个有客观联系的整体。在整体论发展的过程中,其局限性也日渐凸现。整体论的局限性即在于其过于强调整体,对部分与个体的自由有所忽略。为了超越整体论的局限性,考察一下中国历史上的整体论思想是有益的。有学者认为,整体论思想是中国传统哲学的灵魂,是中国传统文化的基本特征,比如道家文化中的“万法归一”、“无极而太极”等(孙慕天,采赫米斯特罗,1996:208)。姑且不论这种说法准确与否,但必须承认,中国的整体论与西方存在着质的差别。现代西方的整体论以科学的分析方法为基础,在探求整体的演化进程中,十分注重整体功能的涌现、各组元的地位和功能,以及整体内部结构与功能的统一。相比而言,中国的传统整体哲学则多为抽象冥思型,并带有神秘与玄想的色彩。很显然,这种玄想整体论的局限性更大。由上可知,整体论对自然界和人类社会中整体与部分之间的关系做出了科学揭示,并因此推动了实践的发展。但同时由于整体论本身的理论局限,人们在社会实践中也造成了一定的失误。这些失误当然不能归咎于整体论本身,其问题的症结在于应用者不适当地将适用范围随意扩大了。

整体论可以有弱解释和强解释,即强整体论和弱整体论(司马贺,2004:158)。施用于生命系统,“将其组成部分堆积在一起并不能产生这些事物,也不能解释其性质和行为”,这一主张隐含着活力论,它与现代分子生物学完全抵触。具体施用于心智时,整体论被用来支持这样的主张:机器不能思考,思维所涉及的不仅仅是神经元的排列和行为。施用于一般复杂系统时,整体论提出,系统的新性质和子系统之间的关系在系统组元那里是不存在的,因此,它要求“涌现”,一个“创造性”的原理。涌现的机械论解释是被拒斥的。

在弱解释中,涌现只不过意味着,复杂系统之组成部分的相互关系在这些组成部分相互孤立时是不存在的。因此,只有当两个或更多物体相互作用时,它们之间才有引力吸引力。我们能够了解双天体的(相对)引力加速的某些情况,但是无法了解相互分离的星体之间的对应情况。

同样,如果我们只研究个别蛋白质的结构,就一点也无法预知,起着酶的作用的一个蛋白质分子可以提供一个模板,另外两个分子可以加入这个模板,从而在参与反应时被模板拽住。这个模板体现了酶的非常实在的物理性质,当只有被放在由某种类型的其他分子组成的环境中才会发挥其

功能。

虽然模板的功能是“涌现”的，但对相互分离的酶分子没有意义。然而，对于键联过程以及该过程中涉及的力，依然可以用参与键联的分子的已知物理化学性质给以完全还原论的解释。因此，涌现的这种弱表现形式即便对于最热心的还原论者来说也并不产生任何问题。

“弱涌现”表现为多种方式。在描述复杂系统时，我们往往感到，引入一些新的理论概念（如力学中的惯性，电路理论中的电压）来说明某些量是很方便的，那些量不能直接观察到，但是可以用可观察量之间的关系来定义。我们经常采用这样的概念以避免指称组元子系统的细节，而只指称这些子系统的总体性质。例如，欧姆构造了一个电路，它包括一个电池（驱动电流在导线里流动）和一个电流表（测度电流感应出的磁力），并根据这个电路创立了电阻理论。通过改变导线的长度，就改变了电流的大小。将导线长度（电阻）与电流表记录下的力（电流）联系起来的方程含有两个常量，它们与导线长度无关，但若换另一种电池，常量就会改变。两个常量被命名为电压和电池的内阻，它们在其他情况下是不被分析的，作为“黑箱”处理。电压和内阻不是直接测出的，而是理论概念，是在欧姆定律帮助下根据测出的电阻和电流推导出来的。

当研究组元在整个系统中的相互作用时，组元的细节往往可以忽略，但是，在忽略子系统之间的（缓慢）相互作用的情况下，往往可以对具体子系统的短期行为进行描述。例如在经济学中，我们研究密切相关的市场，例如，铁矿石、生铁、钢板和钢产品之间的相互作用时，往往假定其他所有供求关系都不变。

采用对涌现的这一弱解释，我们就可以在原则上坚持还原论，尽管根据部分的性质之知识来严格推论出总体的性质也是不容易的（从计算角度说，往往还是不可行的）。采用这一实用的方式，我们就可以在复杂性的每一连续层次上构建近独立性理论，同时还可以构建中介理论，以说明每一较高层次怎样用低一层次上的组元及其关系来解释。

（三）整体论与整体方法

整体研究方法就是指不破坏研究对象的完整性，不对它进行还原分解，以保持其整体性，研究其整体的性质。例如，我们可以用直接观察的方法，从历史的角度来研究“整体”的演化和发展。我们研究地质演化、生命进化，在天气预报中利用卫星来观察研究云层的整体变化，都是在不破坏整体的情况下对这些研究对象进行直接观察。在社会科学中，我们也常用这种方

法。最简单最常见的一个例子是某人犯罪了,人们在寻找其犯罪原因时,不是采用还原分解方法,而是追溯其历史,往往把犯罪的原因归结为教育或家庭的影响。在系统论中的"黑箱方法"就是一种典型的整体研究方法。在黑箱方法中,我们把对象当作一个不能打开的黑箱。要了解黑箱内部的结构,只有通过对系统进行刺激,然后观察其响应,也就是分析系统的输入和输出,并据此研究系统的某些性质、结构和功能等。

整体方法的两个特征:首先,从研究方法上说,不对整体进行分解还原;其次,关于整体的学科、理论、定律、概念不能从关于部分的学科、理论、定律、概念中推导出来,但能用某种整体的研究方法中得到。整体论是一种基于整体方法所形成的哲学思想。它与整体方法既有联系又有区别,就像还原论与还原方法有着区别和联系一样。

在科学研究中,还有一种方法:综合方法。它常常被人误认为整体研究方法,其实,综合方法是指利用还原分析的方法,达到对部分的充分认识,获得关于部分的足够知识,然后在此基础上,对关于部分的知识进行综合,以达到对"部分总和"或整体的认识,从而获得关于"部分总和"或整体的知识。与上面整体研究方法的两个特征相对照,这样的综合方法并不满足这两个特征,它既要采用还原分解的方法,又要从关于部分的知识中综合推导出关于整体的知识,因此综合方法并不是整体研究方法,根据前面的分析,综合方法是典型的还原研究方法,其方法论是还原论的。认识部分肯定对认识整体有贡献,因为部分是整体的组成部分。例如,对细胞的功能和结构认识清楚了,那么关于人体的知识也就增加了。但是,至少有些整体性质的知识不能从关于部分的知识中综合推导出来,从关于部分的知识上升到关于整体的知识并没有简单的逻辑通道,否则,还原方法就能解决一切问题了。

二、复杂性科学与整体论的复兴

复杂性科学与整体论似乎是有着不解之缘,甚至有人把复杂性科学等同于整体论。在界定复杂性科学的性质和范围时,我们说过,最有代表性的说法就是从方法论上进行的,比如钱学森、苗东升的界定,也就是说,复杂性科学的方法论是非还原论的,主要研究系统的整体涌现性。由此,我们可以看出,复杂性科学与整体论有着密切的关系。

自古以来,人类一直在试图理解纷繁复杂的自然现象和社会现象。当面对复杂事物时,人们首先遇到的问题是:这个事物是什么?要得到答案,我们就要把它当作一个整体,了解它的各种特性和表现。一旦当人们对这个事物的整体有一定的了解之后,人们接着要问的问题是:这些特性是怎么

来的？为什么这个事物会产生这样一些特性？于是，人们就开始深入到事物的内部，从事物的组成部分上了解事物整体的性质。当人们还没有深入到事物的内部时，人们对事物的认识是初步的，对事物整体的认识也只能是模糊的；但当开始深入内部之时，人们对事物的过程、机制就有更深入和精确的理解。这种了解达到一定的程度，人们就会把它们综合起来，从而获得对事物整体的新认识。

在远古时期，人们还没有科学的认识工具，对事物只能从整体上认识，从宏观上获得一些表面的认识；所以，我们认识事物，首先认识的是事物的整体而不是部分。整体论的思想方法应该比还原论的思想早。随着西方的近代科学的兴起，原始的整体论逐渐失去了它的市场，在科学研究中的作用也越来越小。伽利略、牛顿、拉普拉斯等近现代的科学家都是用分析、还原的方法对科学做出重大贡献的。而整体论思想则基本上停留在哲学（比如黑格尔哲学）的思辨中，难于对科学研究发挥自己的影响。然而，随着科学的发展，还原方法的弱点也逐渐暴露出来。人们发现，仅仅依靠分析还原，对事物也难于有真正的全面认识。到19世纪，在一些学科中，由于认识的深入，出现了初步的整体研究的趋势。例如，物理学上的热力学和电磁理论、有机化学、细胞学说等等，都对还原论的范式提出了挑战。

从20世纪开始，科学研究对象从简单性和简单系统转向复杂性和复杂系统，要求在方法论上实现根本的转变。经典科学相信客观世界本质上是简单的，复杂性是披在简单性之上的面纱，随着科学的发展必将揭开这层面纱，把复杂性还原为简单性。因此，在面对复杂的问题时，总是设法把复杂性简化掉，即把复杂性当作简单性处理。当对象是典型的简单系统，或者属于不够典型的复杂性问题时，这样处理是可行的或近似可行的。当对象属于真正的复杂性问题时，这样处理必然把产生复杂性的根源简化掉，得到的结果不再能够反映对象的固有特性。把复杂性当作复杂性处理，是复杂性科学的方法论原则。这并非否定复杂性科学也需要简化，而是强调存在不同的简化路线或指导思想。过去数百年中发展起来的简化理论和方法，不适用于正在兴起的复杂性科学的需要。复杂性问题要求性质不同的简化路线，即必须在保留系统产生复杂性之根源的前提下进行简化。一种简化处理即使理论上十分得体，只要它没有保留系统产生复杂性的根源，就不是复杂性科学的简化方法。普利高津提出“结束现实世界简单性”的命题及圣菲研究所要建立复杂性科学，两者目的都是强调把复杂性当作复杂性处理这个新的科学方法论原则。所以，科学的进一步发展，开始要求突破还原论范式，又提出了复兴整体论的呼声。

复杂性科学的对象是复杂系统，而系统的多样性、相关性和一体性产生了系统的整体性或全局性。复杂性科学的根本范畴是复杂系统，为阐释这个范畴形成了一个庞大的概念体系。在这个体系中高居榜首的是整体或整体性概念，整体观点是最重要的系统观点，也是复杂性科学的重要观点，掌握系统思维应从掌握整体观念做起。

贝塔朗菲是系统论的创立者，也是复杂性思想的先驱。他通过生物现象复杂性的全面透视，深刻批判了机械还原论和神秘活力论，提倡有机整体观，科学地定义了“系统”、“整体”、“涌现”等描述复杂性的概念，首次建立了刻画复杂性的科学模型，并通过重点剖析生物、心理、生理、历史等领域的范例，初步建构了复杂性的研究纲领。

贝塔朗菲创立一般系统论的确标志着复杂性科学的诞生，从一般系统论开始，“系统”、“整体”和“整体性”成为科学的研究对象。“一般系统论对‘整体’和‘整体性’进行科学探索，而这在不久前还被认为是超出科学的各个边界的形而上学”（贝塔朗菲，1987：9），他为一般系统论这门新学科的诞生提出了许多新的概念、理论和数学模型，为铲除围绕在生物体等复杂系统中的神秘性而创立了一套科学的术语、理论，从而用科学的光芒照亮了隐藏在隐德来希上的各种神秘现象。贝塔朗菲说：“不管怎样，我们被迫在一切知识领域中运用‘整体’或‘系统’概念来处理复杂性问题。这就意味着科学思维基本方向的转变。”（贝塔朗菲，1987：2）

贝塔朗菲虽然在20世纪40年代就创立了一般系统论，但直到1968年出版的《一般系统论：基础、发展和应用》这本书才真正全面总结他40年来的理论研究工作，阐明其一般系统论思想、内容和理论框架。我们从这部著作中可看到，贝塔朗菲的一般系统论的主要内容包括：一般系统论的意义，系统的若干概念和初步的数学描述，看作物理系统的有机体，开放系统的模型，生物学中若干系统论问题，人类科学中的系统概念，心理学和精神病学中的一般系统论。其中，系统的若干概念及其初步的数学描述这部分所涉及的概念和问题有：系统的定义，生长，竞争，整体性，总和，机械化，中心化，果决性，果决性的类型，科学中的同型性，科学的同一性等。正是在这本书中，贝塔朗菲提出了复杂性科学中的核心概念，例如，系统、整体、整体性、涌现、多样性、连通性等，这些概念为后来的复杂性科学的诞生做好了概念上的准备。一个系统，在贝塔朗菲的术语中，是指任何一个实体，它通过其组成部分的相互作用而维持，它的范围从原子延伸到宇宙，并包括生活中的哲学通例，如电话、邮政、快递系统等。一个系统可能由若干子系统所组成，也可能是更大系统中的一部分。系统的定义核心是相互作用，这就包含了系

统的要素之间不可分割的整体性，也包括了复杂性中的所谓连通性问题。因为系统要素之间既然相互作用，它们之间就是紧密联系在一起的，也就意味着相互连通。

贝塔朗菲常常使用"产生整体或系统"，"理解整体或系统"，"运用整体或系统概念"之类说法，把整体与系统并举，反复宣称"一般系统论的任务是科学地探究'整体'和'整体性'"，即探究系统和系统性。我们可以如此解读贝塔朗菲的这些言论：系统思维的核心首先是强调整体和整体性，在一定程度上说，系统就是整体，系统思维就是整体思维。上述以片面性的说法突出某个重要观点，是许多大学问家喜欢采用的一种表达方式。

控制论的创始人维纳创立其控制论时也是对还原论进行了批判，把控制和通讯建立在整体论的基础上。控制论的基本概念是行为、目的、控制、反馈和通讯等，这些概念用原来的还原论范式都比较难于理解。例如，"目的"是人们经常用到的概念，也是各种行为的一种重要表现，然而，还原论范式却对系统的趋目的性难于作出科学的解释，以至于目的论一直被笼罩在神秘的面纱中。维纳在创立控制论之时，摆脱了传统的决定论思维模式，采纳了统计理论的思想，通过"反馈"把必然性和偶然性有机结合起来，从而用科学的语言描述了原来认为神秘的"目的性"。一个控制系统不是孤立的系统，而是一个与周围环境密切联系起来，能根据周围环境的某些变化来决定和调整自己的运动，特别是控制系统通过自己的反馈机构可以减少系统的无组织程度。在对控制系统分析时，特别强调控制系统各要素之间的通讯和联系，强调系统的整体性，因此，控制论和信息论对整体观念的确立以及整体论的复兴有着重要的贡献。

20 世纪 70 年代兴起的自组织理论：耗散结构论、协同学和突变论。它们也对整体论的复兴作出了自己的贡献，为复杂性科学的整体论范式打下了科学的基础。普利高津的耗散结构论首先就从整体论的思路把研究对象区分为系统和环境，并通过系统对环境的开放来强调系统与环境的联系，开放是系统走向有序的第一个必要条件。在开放的前提下，他又强调系统内部各要素之间的联系和相互作用，认为要素之间的非线性相互作用是系统走向有序的动力。哈肯提出的协同学研究由完全不同性质的大量子系统（诸如电子、原子、分子等等）所构成的各种系统，研究这些子系统是通过怎样合作才能在宏观上产生空间、时间或功能的结构。协同学使用的基本概念有：竞争、协同、序参量和支配。协同学是强调系统的整体性，强调子系统之间的相互联系、相互作用或相互协作。

圣菲研究所的重要成员、人工生命之父兰顿（Langton，C. G.）在他那篇

人工生命的宣言中，首先强调的就是人工生命与通常的生物学的自上而下的分析式的研究方法不同，采取的是自下而上的综合的或合成的研究方法。即将人工系统中简单的零部件组合在一起，使之产生类似生命的现象。他说："人工生命简单地说就是用综合的方法研究生物学：人工生命不是把生命物分解为部分，而是努力将生命物组合在一起。"（Langton，1989）他在90年代中期主编的《人工生命概论》中，几乎整个序言他都在谈综合或合成方法对人工生命的重要意义。他说，不管人工生命的精确含义到底是什么，但总体上可以有把握地说，"这个领域表明着这样一种努力：大大增强综合在生命现象研究中的作用。"（Langton，1995）人工生命的一个重要观点是把生命看作形式的性质，或者说物质组织的结果，而不是物质本身，或者说是内在于物质本身的某种东西。核苷酸、氨基酸，以及其他以碳为基础的分子本身都不是有生命的。然而，把它们以合适的方式放在一起，从它们的相互作用中涌现出来的动态行为却是有生命的。生命是一种行为，而不是一种事物。它是由简单的行为组成的，而不是由简单的事物组成的。人工生命就是要用综合的方法，在其他媒介，如在计算机中，把生命行为从简单的组成部分的简单行为中合成出来。兰顿认为，综合的方法不仅可以使所研究的学科领域理论基础更加坚实，而且还可以导致许多工业上的应用。通过在计算机或其他媒质中把进化过程的内在机制合成出来，由此，我们可以发现很多与传统工程方法相反的全新的解决问题的方法。

把整体思维或系统思维作为"第五项修炼"而大力宣扬的圣吉认为："系统思维是'看见整体'的一项修炼"，"它植基于重视整体互动而非局部分析的思考方式"（圣吉，1999：74-76）。有整体思维，就有非整体思维，但学界一直未从学术上正面剖析过非整体思维。圣吉的一个贡献是提出"片断思维"或"局限思维"的说法，将非整体思维概念化，比较确切且形象。我们已经养成片片段段地看问题，或专注于事件本身的局限习惯来处理周遭的问题，这与我们没有能力把它看作整体有极大的关系；系统思维将引导一条新路，使人由看片段到看整体；这些新颖而有说服力的提法，是圣吉的著作最先提供给我们的。

在系统科学大师中，钱学森可能是对整体性观点最为强调、阐述最多的人。他首先通过对系统概念的界定给出强调整体性的逻辑基础："什么是系统？系统就是由许多部分所组成的整体，所以系统的概念就是要强调整体，强调整体是由相互关联、相互制约的各个部分所组成的。"（钱学森，1988：204）他还从哲学上指出："辩证唯物主义所阐明的物质世界的普遍联系及其整体思想，也就是系统思维。"（钱学森，1988：138）在一篇讨论整体思维实际

应用的文章中,钱学森(1990)提出"要从整体上考虑并解决问题"的命题,揭示了整体思维的一个基本原理。

要做到把对象作为整体来识物想事,第一位的是具备整体意识,自觉地从整体上认识和解决问题。相反,非系统思维首先表现为心目中没有对象整体性的位置,思维活动关注的焦点是某个局部或片断而非整体。一般系统论的创始人贝塔朗菲(1980:309)这样写道:"亚里士多德的论点'整体大于它的各个部分的总和'是基本的系统问题的一种表述,至今仍然正确。"他认为,一般系统论就是对"整体"和"整体性"的科学探索,从而把以前被看作形而上学的、哲学思辨的概念变成为了一个可定量描述的、可实证研究的科学概念。控制论和信息论研究的是系统整体的信息传递、控制协调以及功能优化等问题。耗散结构论首先考虑的是整体系统的自发组织的种种前提条件,从而开创了动态系统研究的新局面。协同学创立者哈肯把协同学定义为关于子系统合作的科学,从而协同学也就是一种关于子系统之间通过竞争和合作形成系统整体的科学。超循环理论研究的是大分子如何自发组织起来,形成协同整合的超循环组织,从而向更高复杂性进化直至生命起源。在混沌学和分形学中,奇怪吸引子具有整体性结构,无穷嵌套的自相似结构也体现着系统的整体性。总之,复杂性科学是对还原论的超越,是对传统整体论的继承和发展,也就是对传统整体论的复兴。

三、复杂性科学与整体论的超越

传统的整体论,虽然正确地看到了还原论观点的局限性,而试图从整体上来把握事物,这无疑有其合理性。但是,由于时代科学水平的限制,这样的整体往往成为一种没有具体内容的整体,从而也就只是没有内容的整体性,或者也可以说是暧昧不清的整体性。一方面,这样的整体论,往往成为伪科学或非科学的避难所。在一定的意义上,近代科学中的种种生命力论、活力论正是这样的整体论。另一方面,这种整体论,实际上又在很大程度上不再鼓励对于对象进行科学研究,整体就是整体,除此之外,再也无话可说,从而实际上往往在科学的名义下就取消了科学。我们也可以将其称为没有分析的综合性。不过,更严格说来,没有分析的综合已不是现实的综合。而且,正是在综合指导下的分析和在分析基础上的综合,把系统论与整体论区别开来。因此,仅仅依靠复兴传统的整体论,是不能产生今天的复杂性科学的,也就是说,复杂性科学不能仅仅靠传统整体论研究纲领,而是像超越还原论一样,也需要超越整体论。

传统东方思维中,以强调事物整体方面见长。体现在宇宙观上,各种学

说都强调宇宙一体,天人合一,天人相通。这也是一种传统的整体论,尽管这种整体思维有其独特的优点,我们也不得不承认它缺乏分析的缺陷,甚至可以说是一种致命的缺陷。缺乏分析的整体是片面性的整体,不是真正意义上的整体、系统的整体。当代科学发展要求把两种传统结合起来并发扬光大,这也是当代系统科学思想发展的富有启迪性之处。

整体论在很大程度上克服了机械论宇宙观的局限,尤其表现在对还原论的批评上,揭示出了事物间的相互依赖性和普遍联系性,但它们仍然带有构成论的烙印,这特别明显地表明在实体主义观念上。它们强调的联系是实体之间的联系,或者可以说它们未能从根本上摆脱实体主义这一窠臼,而事实上这种实体观念是应该加以摒弃的。不摒弃实体观念就不能抛弃构成论,整体论仍将被旧科学观念所束缚。

让我们来看一看巴菲立普(1988:36)对一般系统论的批评,他对一般系统论作了如下四个方面的批评:

(1)系统论者未能坚持他们对分析方法的方法论的反驳。我们知道,系统论的中心论点是,在某些类型的系统中,每一部分或成分只有凭借它与其他部分或成分的联系才获得其自身的同一性。没有借方,就不可能有贷方;有丈夫必有妻子。但从这个无可否认的事实中就必然推出这类部分是不能被单独抽取出来并加以研究吗?杜威、贝塔朗菲(1999:11-12)回答说:"不能。"贝氏说:"任何一个有机体都表现为一个系统,我们用这个术语所指的是由处于相互作用中的要素所构成的一个复合体。根据这个明显的命题所得出的必然结论就是分析性和概括性概念的局限性。首先,不可能把生命现象完全分解成为基本的单位,因为每个单个的部分和单个的事件都不仅依赖于它自身的内部条件,而且也在不同程度上依赖于该整体内部的或它作为一个部分所属的更高级单位的内部条件。因此,一般来讲,一个被隔离部分的动态不同于它在整体联系中的动态……。其次,现实中的整体显现出一些为各个孤立部分所不具有的属性。"

实际上,这种论证是有问题的:第一,部分可以孤立地进行有意义的研究。例如,丈夫可以同其妻子分离开来作为一个男人加以研究,他的许多定义性特征不改变,即是说人们有可能根据部分的知识而对整体做出准确的预测。纵然暂时不能预测,也并不意味着在原则上不可能对这类总体行为做出机械论解释,况且还没有人提出有力的证据来支持这种断言。第二,如果部分的知识只能来自有关整体的知识,那么,如詹姆士所说,这是一个无法实施的方法论,因为,在得以认识某一部分事物之前必须认识所有事物。事实上,系统论者一方面强调部分之间的内在联系,而另一方面仍使用传统

分析科学的技巧与概念，例如，流程图及反馈图、熵概念和“终局平衡原理”等。关于现代数学被用来处理复杂系统，例如联立非线性微分方程，但这并没有明确为什么必须以这种方式把系统当作一个整体加以研究，也未断定采用分析方法便是误入歧途。贝塔朗菲承认，这种方法是“对机械论的引申而不是取代”。

(2)一般系统论未能精确和具体地说明“系统”的含意。贝塔朗菲把“系统”定义为是“由各种处于互动之中的要素组成的复合体”；拉波波特(Rapoport，A.)认为，“用其各部分的相互依赖而作为一个整体发挥功能的整体，便叫做一个系统”；阿科夫则“把系统定义为概念上的或有形的实体，它由相互依赖的各个部分所组成”。这里，他们所使用的“系统”概念除了使他们面对宇宙这个整体之外，没有提供任何基础以使他们能够把注意力集中于其他方面。例如，把一支部队当做一个系统来处理，那么按系统的定义，一支部队不是一个独立的系统，它是一个更大系统的子系统，若再往下推列，子系统下又有子系统，孙子系统，等等，这仍是一种分解分析方法，而不是系统论者的初衷。这样，系统研究面临的关键性的科学难题，就在于如何将所要研究的特殊系统与宇宙的其他部分相分离而不抹杀其界线。这些难点对任何非无关紧要的系统研究都是亟待解决的问题(巴菲立普，1988:62-63)。

如果系统论者说，我选择有关要素组成的实体作为研究的系统。但这样做有两个问题：一是根据什么标准选择。这个标准必定不是系统方法，因为这里所需的知识必须是能选择出他的系统之前的知识；二是他把宇宙整体的一部分与其余部分的相互联系割断，因而违反了系统论者自己的原则——系统内部的联系对整个系统及其诸部分都至关重要(巴菲立普，1988:61-65)。

(3)关于系统论必须包含的内容上含混不清。一般系统论者提出了系统的分类；贝塔朗菲又区分了广义系统论和狭义系统论，把控制论、信息论、博奕论、决策论、拓扑学、因子分析和一般系统论都包含在广义系统论之中，把“系统”概念弄模糊了。

(4)一般系统论未能成为科学的理论。一个科学理论的最重要特征是它对未来可观察事件的预见性，系统论则是事后诸葛亮。贝塔朗菲本人也承认：“决定性的问题在于这些‘新理论’在解决围绕整体性、目的论等一系列难题方面的解释性和预测性的价值。……它与经验事实的联系依然经常是脆弱的。”

有些人认为，复杂性研究就是要超越还原论，回归整体论。一想到系统，整体观念就会占上风，甚至蒙住人眼，用整体论(眼中只看到整体)的盲

目来代替还原论(眼中只看到部分)的盲目。人们常常强调整体大于部分之和,可却很少有人提到整体也会小于部分之和。其实,这是一种误解。复杂性研究并不是一种完全的整体论研究纲领,它不但超越了还原论,而且也超越了整体论。在这方面,法国哲学家埃德加·莫兰论述得比较全面。他提出的复杂性观超越了系统观,代表着科学方法论跨上的一个新台阶。正如陈一壮(2004:17)所说:“系统论超越了还原论,复杂性理论又超越了系统论,它们代表着科学方法论依次达到的三个梯级。”莫兰的思想突出表现在他补充提出了“整体小于部分之和”的原则来改造经典系统论。该原则批判片面的、绝对的“整体性”观念,提出容许系统中存在一定的无序性,以保证组成单元发挥其创造性的自由度。因此,复杂性观的主要贡献不是“涌现”论,而是把被经典科学的简化理性所排除的多样性、无序性、个体性的因素引进科学的视野,以便研究能动系统的复杂的自组织的问题(陈一壮,2004:16)。莫兰认为,复杂方法论可以说代表着西方的科学方法论在系统论思潮后的一个新发展。这从以下两个方面表现出来:①原有的一般系统论强调世界事物的整体性,提出“整体大于部分之和”的原则。莫兰认为这只反映了系统性质的一方面,他又提出了“整体小于部分之和”的原则,补充了对于作为局部的个体的重要性的认识。因为系统以其整体约束也会限制组成单元的特异性和活力的发展,比如过去苏联的集权制的计划经济体制限制地方、部门和个人的主动性的发挥导致社会生产率低下。因此莫兰认为,复杂方法既反对只见部分的还原主义,也反对只见总体的整体主义,而表现为二者的结合。②原有的系统论如经典科学一味强调世界本质的有序性的方面,而把无序性作为表面现象加以忽略。莫兰根据当代科学的最新研究成果提出无序性和有序性共同构成世界的本质。

系统论是在与经典科学的还原论的思想方法的斗争中产生的。它提出整体不能被化归为其组成部分来理解,由相互联系、相互作用的部分有机地构成的系统,具有各个部分在彼此孤立的状态下所不具有的整体新质,这被称为“涌现”。莫兰首先肯定在批判还原论中建立的系统论代表着科学方法论的一大进步。但是,他也指出了经典系统论的原理的不足或缺陷。他说:“……系统论用‘整体论’或‘整体’观来反对还原论。然而,自以为超越了还原论的‘整体论’却实行了向整体的还原:它不仅对部分之为部分闭目不见,而且对组织之为组织十分短视,对统一整体内部的复杂性一无所知”(莫兰,2002:119-120)。一言以蔽之,莫兰认为系统论的缺失就是以单纯的和片面的整体性来代替还原论的局部性,系统论走到了另一个极端,但它与还原论都属于简化范式的范畴:“无论是还原论还是整体论,二者的解释都是力

图简化复杂的统一体的问题。它们一个把整体化归为被孤立认识的部分的特性,另一个则把部分的特性化归为同样被孤立认识的整体的特性。这两种互相排斥的解释属于同一范式"(莫兰,2002:120)。由此看出,莫兰认为系统论虽然高于还原论,但它在相当程度上仍属于简化的方法论。

我国学术界许多人持有的那种认为"整体性"概念是打开系统问题的钥匙,运用它会带来一片光明的想法应该被打破。其实不然,莫兰认为,要素组成系统之后,要素个体之间的自由关系被束缚,因此,整体也可能小于要素之和。"所有系统,甚至包括那些引起涌现的系统,都会对部分加以约束,约束就是对部分进行限制和束缚。这些约束、限制和束缚或者剥夺或者压抑各个部分的优点或属性。从这个意义上讲,整体小于部分之和。"(莫兰,2002:106)我们多年来大家习惯于听说系统使组成部分相互协作从而形成整体上优异的新质,几乎从未听说过整体会以其约束来抑制组成部分的优良品质。今天莫兰向我们揭示了"整体性"的两面性或者说它的双重效用——积极效用和消极效用。讲到整体性的优点时它名为"涌现",讲到整体性的缺点时它名为"约束",而这都涉及同一个整体性的作用,所以整体性是个复杂的概念。莫兰对整体性的两面性说得一语破的:"整体性概念常常被人给弄得太均质化了,在此我想引出它的复杂性。人们看见的仅仅是它被照亮的那一面也就是说它的实在性和它的非实在性的那半边脸。整体性我只是一笔带过,它其实远比我们想像的要大或小。在整体性中有黑洞,有盲点,有暗区,有断层。整体性怀有的内部区分不仅仅是不同部分之间的区分,那是一些分裂——冲突甚至分离——的可能的源头。在一个简化理性占统治地位的世界里很难设想出什么整体性。即使设想出那样一个令人安心的简单整体性也只能是荒诞的。真正的整体性永远是不完整的、有缝隙和裂痕的。真正的整体观承认整体性的不足,这就是黑格尔的忠实继承人阿多尔诺对于黑格尔的巨大进步:'整体性是非真理'"(莫兰,2002:124-125)。这里面包含有莫兰从哲学认识论的高度对片面的、绝对的整体观作出的批判。

但是"整体小于部分之和"的原则还具有更深层的普遍的含义,这就是提升作为组成部分的单元或个体的价值,尊重它们的创造性,而为了给予它们能以发挥其创造性的自由度,且相对松弛整体的约束,提倡部分和整体之间的相互决定作用等等。这些都是对于经典的系统论原理的革新。经典的系统论提出有序性原理,所谓:"有序性是指一子系统的行为对另一子系统的可能性行为有所约束的状态。""总之没有约束,系统的组织内部是无联系的混乱的无秩序的,这样组织就无法工作。只有对系统中各部分的自由性

行为有合理的约束,使系统进入有序状态,系统才能协调配合,才能有计划有步骤地去实现自己的工作目标。""一般地说,系统越是高级,……它的内部就必须表现出更高程度的有序性。""一个系统的约束度越高,其有序度、内部联系程度或组织水平也就越高。"(李建华,傅立,1996:19-20)这里表现了经典系统论对整体性原则和有序性原则的无任推崇。但是在这种指导思想下形成的系统中只存在自上而下的单向作用的刚性的组织联系,个体或单元的积极性被无视。对此莫兰批判道:"我们必须计算整体涌现所付出的束缚代价,我们必须问一问这些约束会不会扼杀部分层次上某些更加丰富的涌现的可能性"(莫兰,2002:124-125)。"单纯的整体是不完整的和残缺的。我们觉得不仅'整体性是非真理',而且整体性的真理就存在于分别的个体性之中(或通过个体性而存在)。当整体观变得复杂起来时,当它不再强调整体集权,不再对自己进行封闭时,整体观就是一个相当丰满耀眼的观点了。它在由相对独立的部分所形成的多中心体系中要比在集中统一的体系中更加风光"(莫兰,2002:125-126)。莫兰提出的"小于"原则对"大于"原则加以制约,在此基础上形成的系统内部不仅含有自上而下的统辖机制,而且含有自下而上的回应机制,形成上下互动,整体和部分相互决定的柔性的组织联系。

由此可见,复杂性科学并不能等同于整体论,它不但要超越还原论,同样也要超越整体论。我们怎样来超越整体论呢?当然,这里的超越,其意旨也是对某种东西的限制,也就是既要经过它又要突破它的意思,和上节超越还原论的意思一样。复杂性科学超越整体论的方法就是用还原论来补充整体论,使还原论和整体论融贯起来,形成一种既能发扬它们优点,又能克服它们缺点的新的方法论。这就是下面我们要论述的融贯论。

第三节 融贯论:复杂性科学的新方法论

从上面两节的分析,我们可以看出,复杂性科学既要还原论,又要超越还原论;既要整体论,又要超越整体论。也就是说,需要把整体论和还原论两种方法论结合起来,形成新的适合复杂性科学的方法论。其实,弱意义上的整体论和弱意义上的还原论相互都吸收了对方的优点,克服了自身的弱

点，因此本质上是相通的，并无本质的区分。在本节中，我们重点来探讨适合复杂性科学的新方法论：融贯论（syncretism）。

一、复杂性科学的两条径路

张世英（2004：9）认为，在哲学史上，粗略地说，有两种追根问底的方式：一个是“主体—客体”结构的追问方式，一个是“人—世界”结构的追问方式。前者是作为主体的人站在客体以外追问客体的根底，后者是人处于世界万物之中体悟人如何与无穷无尽的万物融为一体。与此相应的认识事物主要有两种维度：纵向维度和横向维度。纵向维度的认识方法是从事物的表面的直接的感性存在还原深入到非时间性的永恒的普遍概念中去。从纵向维度去认识事物的方法其实就是还原论的认识方法。横向维度的认识方法是从事物之间的相互联系中，从在场的东西推想到不在场的东西，它也不是摒弃概念和普遍性，但要求在认识过程中达到了对普遍性和“事理”的认识之后，还要更进而超越在场的“事理”进入不在场的“事理”之中。这也就是一种整体论的认识方法。

复杂性科学的对象是复杂系统。面对复杂系统，我们也要从上面的两种维度去认识，由此也就形成了两种研究径路：一是还原论的路径，它把复杂系统逐渐分解，层层剥开，直到找出认为是组成或影响复杂系统本质的子系统或要素；二是整体论的路径，它首先找到认为是组成复杂系统的要素或子系统，逐渐组装整合，看看能否最后得到我们所需要的复杂系统。在把某一整体作为研究对象的情况下，从物质组成和结构方面来看，向下分解形成还原研究方法，向上包容形成整合研究方法。我们用图示的方法来表示复杂性科学的两条路径和两种方法（如图3.1）。

从物质组成来看，整体和部分形成一对相对立的范畴，整体由部分组成，部分由整体分解而来，既没有无整体的部分，也没有无部分的整体。从物质表现出来的性质来说，整体具有部分所没有的性质，人们把这种现象称为“涌现”，整体具有的性质叫做“涌现性”；同样，虽然部分不具有整体的性质，但部分也具有整体所没有的性质，苗东升（2005：4）把这种现象叫做还原释放，部分具有的性质就叫做释放性。从更大范围来看，跨物质层次时，向上跨越就会产生涌现，较高层次具有较低层次所没有的性质；同样，向下跨越就会出现释放，虽然较低层次不具有较高层次所没有的性质，但较低层次也具有较高层次所没有的性质。

还原论建立在“主体—客体”这样的主客二分的哲学语境中，是科学认识的重大进步。人们把自己放在主体的位置上，世界万物皆为客体，世界万

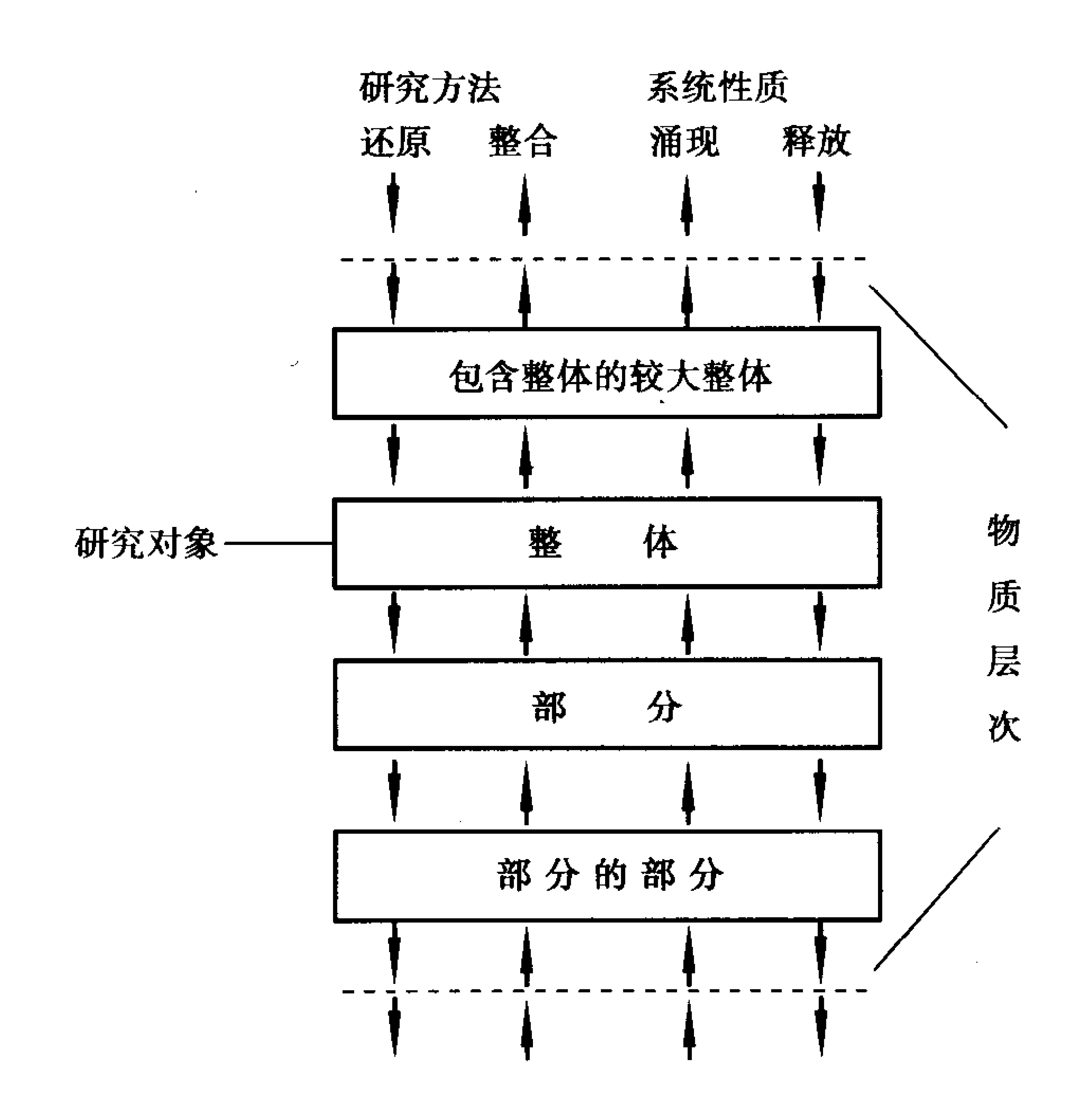


图 3.1 复杂性研究的两条路径

本图根据郭元林博士的博士论文第 29 页示意图改造而成,特此说明。

物在人之外,两者分离、对立,相互外在,只是通过人的主动性、主体性对客体加以认识、征服,才达到主体与客体的统一。作为主体的人通过科学技术等手段进行隔离分割,通过不断的还原过程,寻找事物的同一性、普遍性和不变性,寻找万事万物的基石。通过还原认识的抽象活动,撇开不相同的方面,抽取其共同的、彼此相同之处,构成抽象的普遍性、共同性、统一性和简单性。还原论科学的还原分析方法能够揭示出事物的还原释放性,特别是寻找物质世界的最小组成单元,发现它们独立存在时的特性。所谓还原释放性,指系统组成部分的这样一类属性:如果部分被整合、组织在整体中,它们就被屏蔽起来,整体地考察系统无法了解这类属性;如果解构系统,把部分从整体中分离出来成为独立存在的对象,这些属性就会释放出来,可以为人们直接考察。例如,氢原子有易燃性,氧原子有助燃性,当它们被整合到水分子内时,这种易燃性和助燃性就被屏蔽起来,只有解构水分子的整体,才能把它们释放出来。原子能、遗传密码等的发现表明,宇宙的许多重大奥秘要靠研究这种还原释放性才能揭示出来。我们从中也可以明显看出这种纵向思维和简单性思维的局限,这也就是还原论和还原方法的局限。

与还原论相反，整体论则在横向维度上，在人与世界万物相通和万物一体的哲学理念上，主体和客体由对立走向融通。横向维度强调天地万物都处于普遍的内在联系之中，都处于相互作用相互影响相互勾连之中，这种联系使得每一人每一物甚至每一人的每一构成部分或每一物的构成部分都形成为一个千丝万缕的联系、作用与影响的交叉点。万物一体，万有相通，这是一个千差万别而又彼此融通的世界，一个高度连通的复杂网络。不同的要素相互作用相互组合，能够产生出原来要素所没有的东西，也就是会涌现出新质，形成涌现现象。这种组合和相互作用，特别能激起人们的兴趣，因为它产生了高度的复杂性和无限的可能性。亿万个原子结合成物质，在一定条件下，这种物质可以从固体转变为液体。数以百万计的人集合在一个国民经济系统中，在一定条件下，也可以从繁荣走向衰落。简明地说，无数的个体组织起来，形成了一个动态的易变的自适应的系统。

二、还原与整合：必要的张力

系统哲学家拉兹洛（1985：14）曾指出："传统的整体论和还原论两种思维都难免有不足之处：前一种用信念和洞察代替了翔实的探求，后一种牺牲了融会贯通以换取条分缕析。"这也就是说，还原和整合也是辩证联系在一起的，单纯强调某一个方面都是片面的。近代科学崇拜分析还原，而且几乎把科学方法等同于分析，这就带来了它的机械性，成为形而上学的温床。而传统的整体论，一是由于时代科学的限制，一是强调整体时又过分了，以至它的"综合"往往成为深入研究的障碍。正如恩格斯（1971：206）指出的："以分析为主要研究形式的化学，如果没有它的对极，即综合，就什么也不是了。"所以，复杂性科学要求将还原和整合结合起来，形成适合复杂系统研究的新方法论。

从逻辑上来说，整体论和还原论并不能构成一对对偶的范畴。整体论与它反对的还原论一样，属于统一思维方式。就像埃德加·莫兰（2001：206-208）很早就指出的："整体主义与它反对的还原主义同属于简化的原则（前者是关于整体的简化思想和把一切都化归为整体）"。"整体主义只包含对整体的局部的单方面的简化的看法。它把整体的概念变成一个属于系统的其他概念都归结为自身的概念，从而使这个概念变成一个汇总的概念。因此整体主义属于简化范式。"法国哲学家帕斯卡也明确指出："我认为不认识整体就不可能认识各个部分，同样地不特别地认识各个部分也不可能认识整体。"莫兰认为，从帕斯卡的这段话中，我们可以得出一种更高级的理解方式，它建立在从部分解释整体和从整体解释部分的建设性的循环的基础上；

也就是说这两种解释既不消除它们彼此之间的对立性，又通过它们连接起来的运动本身变成互补。“我们的系统观是对还原论和整体论的超越，它通过统合两派各自所有的部分真理来寻找一个理解原则：它不应该为了部分而牺牲整体，也不应为了整体而牺牲部分。重要的是阐明整体与部分之间的关系，它们互相凭借。”（莫兰，2002：120）正是这个动态的环路构成了说明和解释。在这个方法中，维持从简化逻辑来看相互排斥的两个解释过程之间的某种对立性和竞争性，这不是缺陷，而是有积极的作用。打个比方说，磁石具有磁性，有南北极之分，但南北极却永远联系在一起而无法分开。无论我们把磁石分割多小，磁石永远还有南北极，而不能单独得到单纯的南极或北极。在一个系统中，整体和部分也像磁石的南北极一样永远都联系在一起，我们无法得到单纯的整体或部分。当整体论者把一切归结为“整体”的时候，如同还原论者把一切归结为“部分”一样，它在思维方式上就重新坠入了它所反对的还原论。

还原方法和整体方法在科学研究中就像我们的左右脚，如果要协调和谐地走路，就必须同时使用左右脚，而不能在使用一个脚的时候忘了另一个脚的功劳，甚至用一个脚否定另一个脚。因此，在认识复杂系统的过程中，我们既要做纵向的分析，又要做横向的综合。纵向的分析是把整体分解为部分来加以认识，认识部分是分析的主要任务。客观世界本来总是处于相互联系之中的，但人们为了深入认识部分，同时也是为了更好地认识整体，就不得不把特定系统和整体从普遍联系中暂时划分出来，分门别类地孤立静止地加以剖析。正因为如此，科学研究是离不开分析的，离开了分析就不可能深入事物的内部，就不能剖析事物的细节。由此可见，分析是认识走向深化的前提。从哲学的高度来看，传统科学就是按照纵深方向，追求抽象的永恒的概念，并以它作为事物的终极目标。横向的整合则与此相反，它是把部分综合为整体来加以认识，认识整体是整合的主要任务。为了实现综合，就要把各个部分、各个要素、各个方面联系起来，有机地组织起来，使之成为一个有机的整体。显然，真正的整合并非把诸多部分、诸多要素、诸多方面简单地混合在一起，机械地加和在一起。真正的整合要求揭示系统的部分、要素诸多方面所不具有的整体性质，从而发现全新的系统整体具有的性质。科学研究离不开整合，离开了整合就不可能认识研究对象整体，也不可能认识对象整体内部的部分、要素和各方面之间的本质的统一的联系。于是我们可以说，整合是分析的深入，也是分析的归宿。当代科学研究范式从分析走向综合，从分门别类研究走向系统综合研究，这乃是科学思想的革命和进步。从哲学的高度来说，横向的整合所追求的是隐蔽于在场的当前事物背

后的不在场的，然而又是具体的事物，它要求把在场的东西与不在场的东西、显现的东西与隐蔽的东西结合起来。科学的最高任务不只是达到同一性和相同性，而是要更进一步达到各种不相通的东西相互融合的整体，也就是要达到天地万物之间的相通相融。

其实，即使是传统的简单性科学也需要还原与整合的相互结合，传统的哲学也对分析和综合及其互补做过很充分的论证。面对复杂系统，许多学者又结合复杂性科学，重新提出了这个问题。而且面对复杂系统的复杂性，传统的单向研究显得更加无能为力，因而迫切需要新方法论的指导。

三、融贯论：复杂性科学的新方法论

复杂性科学要求把整体方法和还原方法有机地结合起来，以形成适合复杂性科学所需要的新方法论。但是，这两种方法论如何结合呢？也就是说有什么样的结合方案呢？我们认为，在复杂性科学研究中既要从整体着眼，又要从细处分析着手，也就是说，在整体观的观照下，把向下和向上的两条路径结合融贯起来，形成还原论和整体论有机结合的融贯论。在这方面已经有学者做过有效尝试，例如，有我国著名科学家钱学森提出的综合集成方法论和美国学者欧阳莹之提出的综合微观分析。成思危（1999）在论述复杂性科学方法论时也明确提出要还原方法和整体方法相结合的原则。苗东升（见：许国志，2000：32-34）在论述系统科学方法论时也提到两者的结合，并对此做了比较详细的论述。

20 世纪 70 年代末，钱学森提出把还原论方法和整体论方法结合起来，即系统论方法。经过十多年的研究和发展，特别是经"系统学讨论班"的反复讨论，钱学森（1990）对系统论方法的一般原则做了具体化，形成了综合集成方法（meta-synthetics）。虽然那个时候复杂性科学还没有取得多少具体的研究成果，但他与于景元、戴汝为（1990）先生一起，率先提出了复杂性科学的新方法论问题，也就是他的从定性到定量的综合集成方法。他们把这个方法概括出以下四个特点：

（1）根据开放的复杂巨系统的复杂机制和变量众多的特点，把定性研究和定量研究有机地结合起来，从多方面的定性认识上升到定量认识。

（2）由于系统的复杂性，要把科学理论和经验知识结合起来，把人对客观事物的星星点点知识集中起来，解决问题。

（3）根据系统思想，把多种学科结合起来进行研究。

(4)根据复杂巨系统的层次结构,把宏观研究和微观研究统一起来。

他们认为,正是上述这些特点,才使这个方法具有解决开放的复杂巨系统中复杂问题的能力,因此此法具有重大的意义。其实,钱学森的综合集成方法论就是把还原论和整体论有机结合起来,是方法论上的一种创新。他把还原论和整体论的结合具体化为一种可操作的方法,令在复杂性科学研究中能够真正实现。运用这个方法也需要系统分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,实现 1 +1 >2 的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的。综合集成方法吸收了还原论方法和整体论方法的长处,同时也弥补了各自的局限性。它是还原论方法与整体论方法的辩证统一,既超越了还原论方法,又发展了整体论方法,是科学方法论的重大进展,具有重要的科学意义和深远的学术影响。

还原论方法、整体论方法、综合集成方法,都属于方法论层次,但又各具特色,各有不同。还原论方法采取了从上而下,由整体到部分的研究途径,整体论方法是不分解的,从整体到整体。而综合集成方法既从整体到部分由上而下,又自下而上由部分到整体。正是研究路线上的不同,使它们研究和认识客观事物的结果也各不相同。形象地说,可表示如下:

整体论方法:1 +0 =1

还原论方法:1 +1 ≤2

综合集成方法:1 +1 >2

综合集成方法论的提出也得益于以计算为主的现代信息技术的发展。综合集成方法的实质是把专家体系、数据与信息体系,以及计算机体系有机结合起来,构成一个高度智能化的人机结合系统。这个方法的成功应用,就在于发挥这个系统的综合优势整体优势和智能优势。它比单纯靠人(专家体系)有优势,比机器体系更有优势。它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息统统集成起来,从多方面的定性认识上升到定量认识。综合集成方法的理论基础是思维科学;方法基础是系统科学与数学科学;技术基础是以计算机为主的现代信息技术,哲学基础是马克思主义的实践论和认识论。

综合集成方法论是研究复杂系统和复杂巨系统(包括社会系统)的方法论。在应用中,将这套方法结合到具体的复杂系统或复杂巨系统,便可以开发出一套方法体系,不同的复杂系统或复杂巨系统,方法体系可能是不同的,但方法论却是同一的。如同物理学有物理学方法,生物学有生物学方

法，但方法论是同一的，即还原论方法。

在国外，最明确提出并做了比较全面论述的是美国学者欧阳莹之（2002：1-8，59-72），她在专著《复杂系统理论基础》一书中对复杂性科学的新方法论做了详细的探讨，并把它称为"综合微观分析"（synthetic micro-analytics）。她说：

> "我们所考察的诸学科和数学的研究对象，覆盖了物理系统、生物系统、社会系统，以及抽象系统。可是，当我们要试图来洞察其论题的多样性时，我们发现了一个共同的综合微观分析方法（synthetic micro-analytic approach）。这种综合微观分析方法形成了一个宽广的理论框架，在这个框架中，那些描述组分及组合系统的概念，共同有力地解释了大尺度组合作用的复杂性。这种方法与微观还原论（micro-reductionism）不同，微观还原论狭窄的理论框架没有给系统概念（system concepts）留有余地。"（欧阳莹之，2002：4）

欧阳莹之把传统的还原论称为微观还原论。她认为，对于小的简单系统，这种自上而下的还原方法是很成功的。在普遍使用这种方法时，微观还原论在策略上假定大系统不过是由许多相同的小系统组成的，可以由同样的理论框架和方法进行处理。这种假定——包含在"整体乃是部分之和"这一口号之中——在其部分之间不存在相互作用且不相关组分构成平凡系统时，是正确的。组分之间的相互作用与关系使得整体大于部分之和，因此，更大的整体并不是更大的总和。它们形成了结构，出现了多样性，产生了复杂性，使组合变得重要。她说："微观还原论认为：相互作用的影响可以通过在其口号中加入'及关系'来说明。没有办法不考虑'关系'就进行加总，这种轻松的添加是一种自欺欺人（self-deception），它使得许多学科工作是没有说服力的，包括物理学中最大的分支。对具有许多相互作用组分的大组合系统中的结构形成，进行理论处理是非常困难的，它给科学带来了全新的局面。"（欧阳莹之，2002：4-5）

具有数百万相互作用组分的系统，并不是具有少数组分的系统的"放大"版本，它们的结构不仅定量不同，而且定性不同，因此，这造成了很多不同类型的问题，需要不同的理论方法予以处理。我们能够用个体行星运动来对太阳系进行适当的描述，但我们不能仅仅用个体恒星运动来理解这个由数十亿个恒星组成的星系。要想理解星系，我们需要新的理论工具，包括诸如旋臂等星系概念。

小的组合物与其组分处于同样的组织层次（organizational level）；大系统

则构成更高的组织层次,这是一大差别。单层次(single level)上的实体可以由单组概念刻画,而不同层次(different levels)上的实体通常由不同的概念刻画。因此,联系两个层次的理论就与单层次理论截然不同,这一点被微观还原论所忽视,因为它仅仅承认单层次理论(singlelevel theories),并假设它们足以解释跨层次(interlevel)中出现的情况。这种假设是得不到保证的。跨层次的解释需要一个理论框架,在这个框架中,一个组织层次上系统的行为和较低层次上组分的行为,以及两层次间的关系都要得到解释。这就是欧阳莹之的综合微观分析的框架,它可以联系系统的描述层次和组分的描述层次,但它没有抛弃系统概念,而是在解释组合作用时把系统概念纳入到组分概念(constituent concepts)中,从而允许有多种视角。

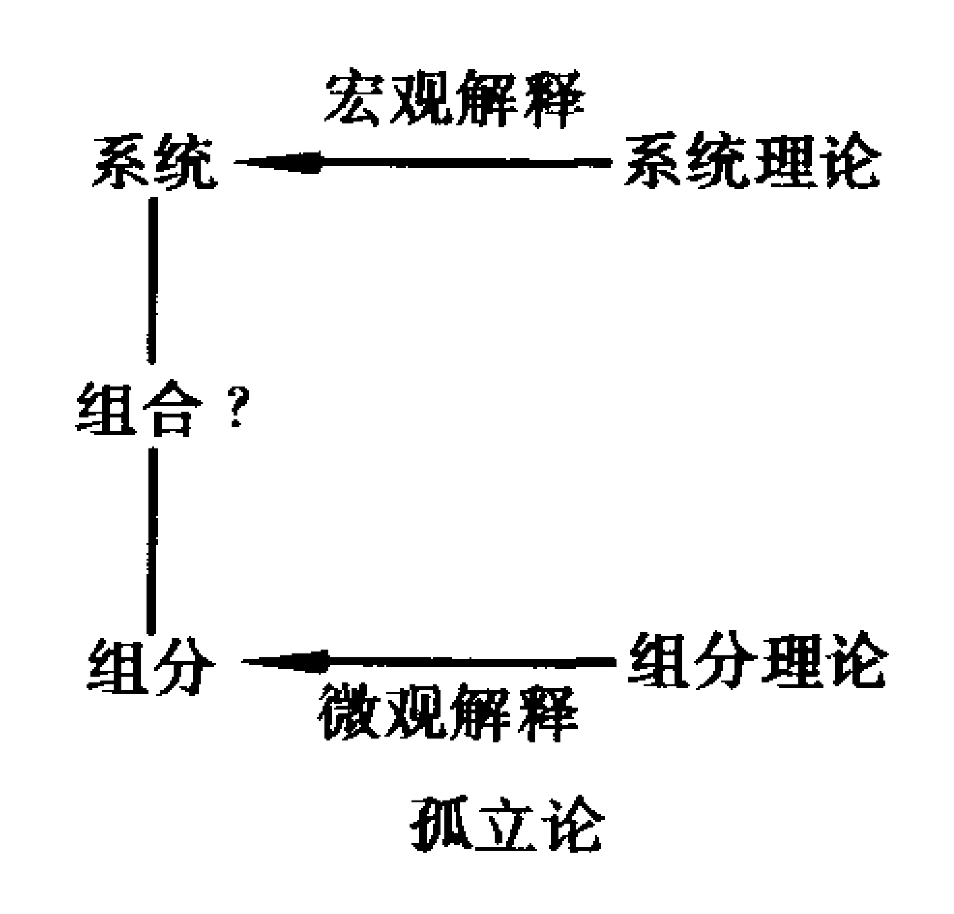
欧阳莹之(2002,6)认为,在研究大尺度组合的过程中,科学家不是把无数的部分放在一起进行研究,而是对这个复杂整体进行微观分析。他们寻找那些产生特定系统特性(system properties)的组分行为,而不是从特定的组分行为出发,去研究这些行为带来的系统模式(system patterns)。综合微观分析仍然使用自下而上的演绎方法,但把组合系统当作一个整体,用自上而下的观点指导研究。系统和组分的观点,分别由各自的实验得到了证实,这一事实告知科学家们在将两者结合起来时,要考虑近似、理想化,以及可能的偶然因素。如果不知道这些,盲目地根据组分定律进行演绎,就不可能把由大尺度组合产生的复杂性解释清楚。

科学史目睹的,不是通过排斥系统概念渐次还原的理论结构,而是不断引入促进微观分析的包容性更强的综合概念框架。综合框架的另一个例子,是动力学的现代表述。它既包含动力学过程整体的概念,又有它相继阶段的内容,从而形成了混沌研究(study of chaos)的基础。我们的概念结构扩展了,但扩展速度远比它们所解释现象的数目的爆炸性增长速度慢得多。扩展速度(不是思想荡涤的速度)的差别,证实了理论推理的统一威力。"统一有多种风格。综合微观分析不靠约化进行统一,而靠建立一个科学的联邦统一体。在这个宽泛的机构框架中,系统理论和组分理论都有一定程度的自主性。它与由微观还原论形成的帝国统一体不同(微观还原论通过在组合系统的描述中取消系统概念来主张帝国统一体),把一切都置于组分理论的从属之下。"(欧阳莹之,2002:7)

欧阳莹之的综合微观分析有什么样的特点呢?为了说明这一点,她把综合微观分析与整体论、孤立论(isolationism)以及微观还原论做了图示比较。"假设我们将对系统的描述及其组分的描述想像成截然不同的二维概念平面(conceptual planes),分别称为宏观平面(macro-plane)和微观平面

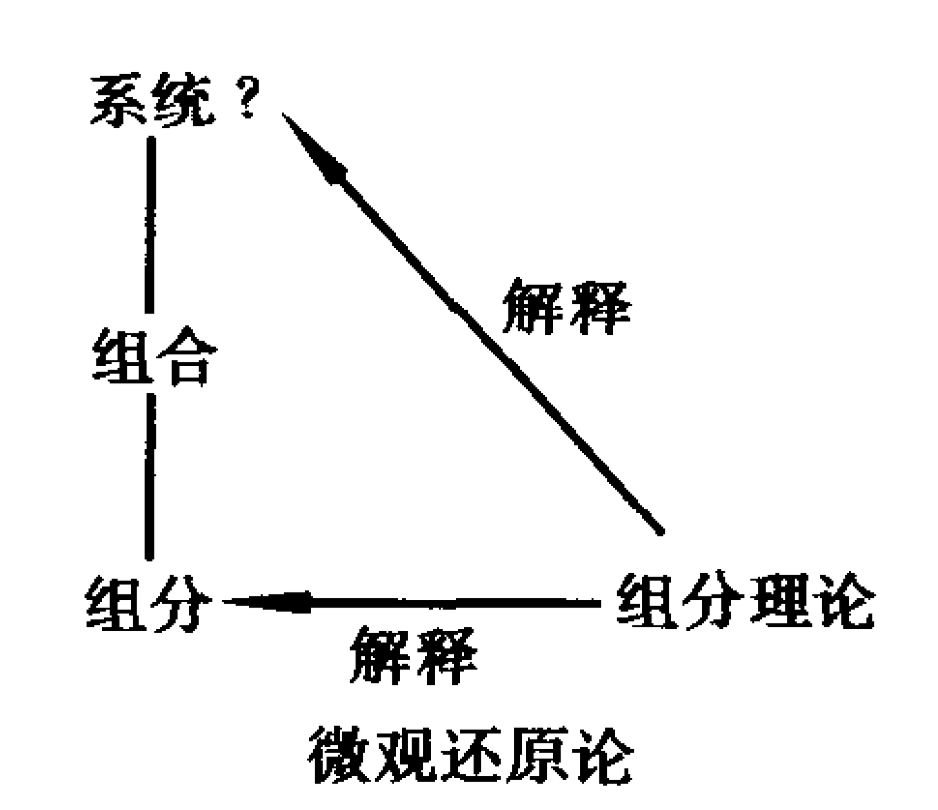
(micro-plane)。微观还原论抛弃了宏观平面,整体论抛弃了微观平面,而孤立论抛弃了两个平面之间的联系。它们都是简化的、有缺陷的。实际存在的关于组合的科学理论更加复杂。它们开辟了一个三维的概念空间(con-cep-tual space),既包含微观平面,又包含宏观平面,并希望通过填补两者之间的空白达到合并两者的目的。这就是综合微观分析方法。"

从本体论上讲,组合系统由组分组合而成。组分可以通过那些代表它们的理论和概念而变得可以理解。我们对组分理论和系统理论之间的概念联系感兴趣。①孤立论认为系统理论以其自己的方法被加以理想化而推广,而且它们与组分理论是不可连结的。如果没有合适的理论表述,组合这一概念就变得模棱两可了。孤立论成了一个断言系统作为一个有机整体不可分析的整体论。②微观还原论认为系统和组分的概念相关紧密,因此,系



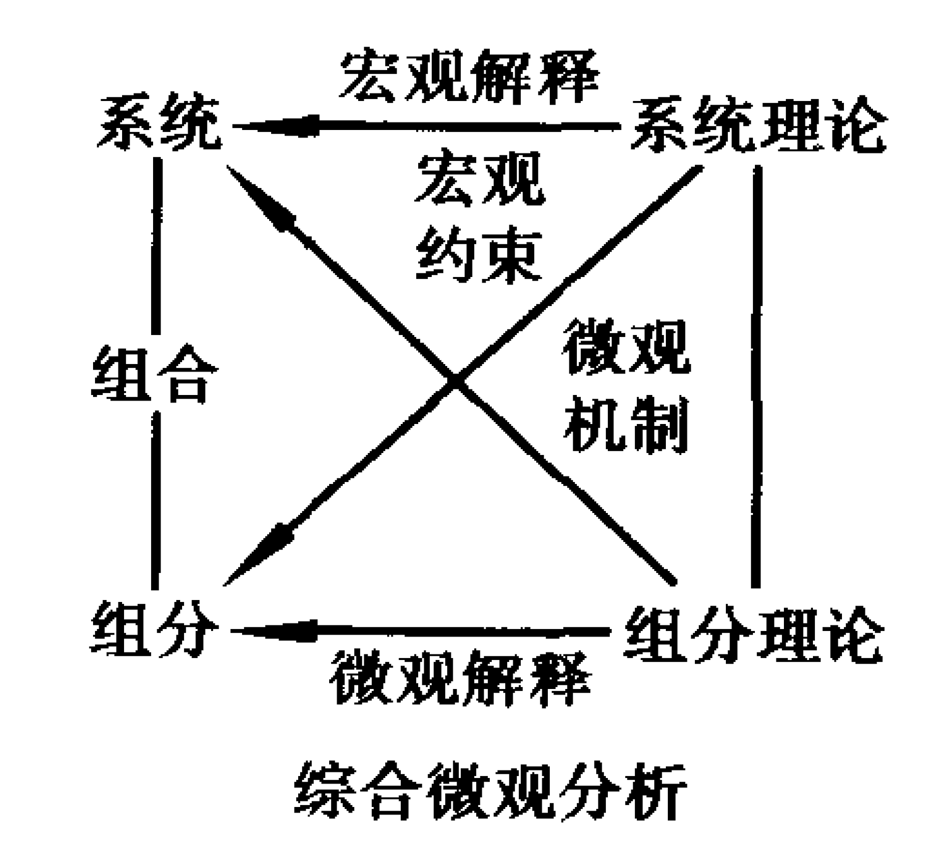
孤立论

孤立论认为,系统与组分是不可连结的,但认为存在分别对系统与组分进行解释的理论。



微观还原论

微观还原论认为,系统由组分组成,对组分的解释就是对系统的解释,系统理论是没有必要的。结果只剩下一个由相互作用元素构成的集合。



综合微观分析

综合微观分析以一个宽泛的理论框架,把自上而下分析和自下而上的综合有效结合起来。组分的微观解释受到系统理论的宏观约束;系统的宏观解释必须要考虑组分的微观机制。

图 3.2　孤立论、微观还原论与综合微观分析示意图

统理论是可有可无的,用理论和概念的术语进行单独表述就足够了。但是,没有系统概念,复合的完整性乃至组合的概念都变得虚幻了。我们被迫说这儿除了一个相互作用元素的集合之外别无所有。③综合微观分析构成一个宽泛的理论结构,它包含两类关于系统行为的解释:用系统理论的术语表述的宏观解释,以及联系系统和组分理论的微观解释。这种联系包含演绎、定义、近似和关于结构形成的独立假设等,它是不可消除的,尽管它可以非常严格。它不像微观还原纯粹的自下而上观点。综合微观分析是结合了自上而下观点和自下而上观点;微观解释则从本质上同时应用了理论、概念和系统理论,系统表述中的组分概念通常被解释为微观机制;组分表述中的系统概念有时被解释为宏观约束(如图3.2所示)(欧阳莹之,2002:60-61)。

分析和综合曾被古希腊人在经验性调查和数学证明中使用。随着近代科学的兴起,它们变得越来越重要,并由笛卡儿和牛顿进行了表述。粗略地讲,在分析中,科学家将复杂的问题分解为他们已经透彻研究过的更为简单的问题。在综合中,他们从简单问题的结果出发,得到复杂问题的解答。"分析预设了整体的一些概念。在一个复杂问题变得可分析之前,它必须得到充分清晰的表述,这样就可以提出非常具体的问题,不然,人们甚至可能不知道要分析的是什么。如果一个人不能清楚地提出一个问题,他就很难指望得到满意的答案。当我们考虑到复杂问题的易懂性和表述时,分析和综合就成为一个单独过程中的步骤,在这个过程中综合既出现在分析之前,也出现在分析之后。那个过程,我称之为综合分析(synthetic analysis)。"(欧阳莹之,2002:60-61)

先于分析的综合和后于分析的综合在抽象和普遍性的两个层次上起作用。原始的综合给出了一个宽泛的概念框架,以使科学家们能够把复杂问题当作一个问题来解决,并防止他们在陷入到分析问题的细节时,迷失对问题本身的把握。综合框架把分析概念作为一个结构的元素,并强调它们的内在联系。它可能是粗糙的,并将为分析的结果所修改、改进和巩固。然而,甚至在粗糙状态它也是首要的,因为它使得分析变得可行并指导分析。建立一个成功的综合框架是科学上恒久的一大进步。

由于它的普遍性,出现一个综合框架覆盖了相当大范围的现象,但是相应的抽象性也表明,在成为一些特定类型现象的明确理论前,它必须被证实。证实是分析和随之而来的综合要做的工作,它们为特定的复杂问题提供具体的解法。分析采用一种模块方法(modular approach),鉴别弱的概念联系,做出一些近似来切断这些联系,把问题分解成简单的几部分再做详细的研究,于是就片断建立各种各样的模型和独立验证。最后的综合通过恢

复这些联系来把各个片断的解决方法结合起来,从而把分析结果和最初的复杂问题结合起来。

欧阳莹之认为,要用对组分的了解来研究大组合系统的行为,综合微观分析是不可或缺的。一个综合框架被建立起来,微观分析在这个大方向下进行,因此组分作为整体的部分而被认识,它们之间的联系作为组合系统的结构而被掌握。我们描绘一个组合系统,用精确地抓住了明显特征的宏观概念提出问题,将其微观分析为组分,深入研究下去以找寻组分的行为和机制来回答系统问题(system questions)。这个方法既不停留在整体论要求之上(top),也不是从下(down)作微观还原论所规定的单程旅行。反之,它将自下而上的观点和自上而下的观点结合起来,作从整体到部分再回来的双程旅行。微观原因的综合沿着微观分析所指示的道路进行,这条道路将引导我们返回宏观概念所限制的现象,因此不会迷失在复杂性的迷宫之中,而纯粹的自下而上旅行则很容易迷失。我们不是从微观概念进行演绎,而是用宏观概念之网去捕获和宏观现象的解释相关的微观信息。于是,系统和组分概念就在解释组合系统行为时结合了起来(欧阳莹之,2002:62)。

综合微观分析的理论框架包含两种对系统行为的解释:宏观解释和微观解释。它们并非是互不相关的。微观解释回答宏观解释所描绘的问题,宏观解释中所澄清的系统概念则指导微观分析。

宏观解释使用代表系统整体的宏观概念,而不涉及其组分。宏观解释可以在热力学、流体力学、经典力学、孟德尔遗传学以及宏观经济学中找到。从历史上看,宏观解释和作为整体的系统理论出现得比它们的微观解释要早。原子物理学、核物理学和基本粒子物理学从系统推进到其组分,热力学先于统计力学。与大系统相关的理论科学通过分析而不是构建而推进。同样,生理学和心理学在历史上也是沿着分解而不是组合的方向进行的。

当科学家们已经把系统作为整体掌握了,并且认清了它们的组合本质时,他们开始寻找隐藏着的微观机制。微观分析的努力产生了大复合物的微观解释,它跨越了两个组织层次:组分层次和系统层次。微观解释必须把组分和系统的行为联系起来。"微观机制和向上因果关系通过运用组分概念来解释系统行为。宏观约束和向下因果关系则用系统概念解释系统内部个体组分的行为。""向上因果关系和向下因果关系代表了两种看待系统的粗略方式,科学理论的综合框架十分宽泛,足以使它们协调地共存下去。"(欧阳莹之,2002:70)

按照笛卡尔第二条原则进行的还原分析,原本就是为了认识整体而进行的,思维的行程不以还原到部分为终点,必须从部分再回到整体。沿此路

径展开的分析思维是研究整体的一种思路,还原论科学由此制定的研究方法原则上都可以吸收到复杂性科学中。复杂性科学与分析科学的内在联系就是从这里生发出来的。但复杂性科学并非简单地移植照搬还原论的分析思维,而是经过必要的改造,形成自己的特点。对还原论而言,思维活动成败的关键在于对系统的分析是否合理、科学,分析是第一位的,分析后的重新整合是第二位的。

笛卡尔原理就只讲分解不讲综合,不提回到整体,反映出分析和综合在他的方法论中占据显然不同的地位。受其影响,传统的理论和自然科学几乎都只讲分析,很少提到综合,只有工程科学才强调综合。相反,对复杂性而言,思维活动成败的关键是分解后如何再回到整体,即把分析所得结果综合起来去描述系统的整体特性,综合是第一位的,分析是第二位的。复杂性思维的行程从提出对象的整体性问题开始,并在起点上已具有一种虽然笼统却是整体性的认识。复杂性思维又以整体的认识和解决问题为终点,分析是为了综合,二者都是从起点的整体认识上升到终点的整体认识的手段和桥梁。在从起点到终点的整个过程中,思维的运作始终是在整体观照下展开的。

现代系统理论注意到系统论与传统的整体论,以及还原论的联系与区别。在 20 世纪 50 年代,与贝塔朗菲一起创立一般系统论研究会的拉波波特,他在 1986 年出版的《一般系统论》一书中用了相当长的篇幅专门讨论了“分析方式和整体方式”与系统方式的区别和联系。在拉波波特(1993:8)看来,系统方法实际上是分析方法和整体方法的整合:“一般系统论的方式将试图把分析的和整体的观点与描述性的和规范性的观点整合起来。我们的目的是要证明这些观点决不是不能共存的,它们揭示出关于系统论的统一处理方式的互补的和不同的方面。”

在实际应用上,系统自组织理论研究中使用的中观方法,其实质就是一种融贯论的方法,它试图以此来吸取整体论和还原论之长,并避免两者的不足。中观方法,在耗散结构理论研究中体现为局域平衡假设。对于一个非平衡系统,将系统划分为宏观上足够小、微观上足够大的单元,从而沟通宏观和微观、整体和基元。哈肯在《高等协同学》中专门讨论了中观方法,他写道:“在微观层次上用各个原子或分子的位置、速度及其相互作用描述所研究的液体。在中观层次用许多原子或分子的集合描述液体。假定这种集合比原子之间的间距大得多,但比正在演化的宏观模式小……当我们研究连续分布的系统(各种流体、化学反应等)时,我们将从中观层次出发,并且预测演化的宏观模式的方法。”(哈肯,1989:25)

总之，复杂性科学不要整体论不行，只要整体论也不行；不要还原论不行，只要还原论也不行，正确的做法是把整体论与还原论融贯结合起来。用哈肯的话来说，需要“在纯粹分析思维与整体思维之间架起一座桥梁”（哈肯，1988：中文版序），即建立融贯思维。就科学思维层面来看，复杂性科学的融贯论要求把整体论和还原论结合起来，在整体观照下分析，在整体观照下综合，在分析和综合的矛盾运动中实现从整体上认识和解决复杂性问题。就哲学层面来看，复杂性科学的融贯论要求把直观的整体领悟与科学的逻辑推理结合起来，把抽象思维和形象思维结合起来，把科学方法的可操作性和哲学的思辨性结合起来。复杂性科学要吸收整体论从整体上看问题的长处，以及还原论深入分析的优点，注意克服它们各自的片面之处，将两者整合起来形成部分和整体、分析和综合相结合的融贯论。在融贯论中，既包括客观的过去和现在，也包括未来；既重视分析，也重视综合；在研究具体系统时，既注意部分，也注意整体。从内外上下、横纵前后认识和解决问题，这是融贯论的精髓所在。

第四节　复杂性科学的方法论原则

我们已经从哲学方法论的层面讨论了复杂性科学与还原论、整体论之间的关系，并指出复杂性科学既不能完全按照还原论的纲领，也不能完全按照整体论的纲领，而是要两者的结合，形成新的方法论，即融贯论。那么，我们如何把这个研究方法论纲领贯彻到复杂性科学中去呢？在复杂性科学的研究过程中，我们应该遵循什么样的方法论原则呢？下面提出的五条复杂性研究的方法论原则就是我们上述融贯论的具体化。

一、还原方法与整体方法相结合

古代科学研究的方法论本质上是整体论，强调整体地把握研究对象。这种整体论是朴素的、直观的，它没有把对整体的把握建立在对部分的精细了解之上。近400年来科学遵循的方法论是还原论，主张把整体分解为部分去研究。在这种方法论指导下，近现代科学创造了一整套可操作的方法，在许多认识方面取得巨大成功。然而，直到现在为止，即使在弱还原的意义

上，面对生物现象和其他各种各样的复杂系统，还原方法也并非是万能的。一般系统论就是通过揭露和克服还原论的片面性和局限性而发展起来的。朴素整体论没有也不可能产生现代科学方法，但包含着还原论所缺乏的从整体上认识和处理问题的方法论思想。研究表明，随着科学越来越深入到更小尺度的微观层次，我们对物质系统的认识越来越精细，但对整体的认识反而越益丧失。现代科学表明，许多宇宙奥秘来源于整体的涌现性。还原论无法揭示这类宇宙奥秘，因为真正的整体涌现性在整体被分解为部分时已不复存在。而人类的社会实践也越来越大型化、复杂化，特别是人类社会面临的一系列全球问题的形成，也突出强调要从整体上认识和处理问题。尽管在还原的道路上充满着曲折和艰辛，我们并不能由此得出还原论在复杂性科学研究中彻底过时的结论。因为并没有逻辑上的理由表明在复杂系统中还原是不可能的；相反，却有理由表明它是可能的（林定夷，2003：360-376）。"实际上，从科学动力学所含意义上说，理论还原的每一步，即使是局部性的成功，都会构成科学理论的巨大进步；而反还原论的纲领却在某种意义上起到消极的作用，它阻碍人们去主动地探索合适的"外延性定义"和"桥接原理"，以便积极地去实现理论的还原。"（林定夷，2003：360-376）

科学理论的还原是科学研究的基本方法或途径，但它并不是唯一的方法或途径；科学研究的另一条方法或途径乃是理论的"整合"。整合的方法与还原的方法有着原则性的不同。"所谓'理论的还原'，它乃是通过术语还原和规律还原的方式，使一个理论能从另一个理论中导出，从而使一个学科的问题能用另一个学科的理论做更深层的解释，并通过把许多学科的理论最终向统一学科做还原的方式，使科学理论趋向统一。而'理论的整合'却不同，它往往是将各个学科中的问题放到更加广阔的脉络中寻求对它们的统一的（一致性的）或系统性的理解。"（林定夷，2003：360-376）因此，整合的结果，往往是产生理论的融合、合并，乃至产生全新的综合性的学科（张华夏，1987：32）。例如系统论、信息论、控制论等横断学科的产生就是理论整合的结果，并且企图在更大范围内实现"整合"。

贝塔朗菲（1987：31）在《一般系统论》一书中，十分恰当地从"整合"的角度阐明了一般系统论在复杂系统研究中的意义，并且十分有启发性地指明了这种整合的特点。他认为一般系统论是要"研究'垂直'，通过各科学的世界统一的原理。这有助于我们接近统一科学的目标"。他企图借助于整合方法来实现对复杂系统的研究，从而跳出还原论的窠臼。但是，贝塔朗菲在肯定实现"整合"的道路来探索复杂性的一种可能的基本途径或可能方法之后，却片面地过分否认了"还原"同样也是一种探索复杂性的基本途径或

可能方法。贝塔朗菲在他的书中并没有对科学还原的可能性或不可能性做出精细的逻辑分析，就断言它是“空想”，是“无益的必然牵强的希望”。

在复杂性科学研究中，还原方法与整合方法决不是相互排斥、互不相容的，而是有可能协调发展，且在探索复杂性的道路上共同起到作用的。从逻辑上来说，并没有逻辑上的理由表明“整合”的道路必然成功，或者它对复杂性研究来说，比起“还原”的道路有着某种先验的优越性或可能性。尽管由于还原要引进桥接原理和外延性定义，而桥接原理和外延性定义都要依赖于经验的发现，所以并无先验的逻辑上的理由可保证还原一定能实现。但整合方法也存在同样的问题，同样要依靠经验的发现。整合比起还原来，并不存在任何先验可判定的优越性或可能性。在复杂性研究中，整合路线和还原路线可以是并行不悖的，并不需要用一个去否定另一个。相反，我们要让它们各自发挥自己的优势，克服它们的缺陷，以实现辨证的融合。

总之，研究复杂性不要还原论不行，只要还原论也不行；不要整体论不行，只要整体论也不行。不还原到元素层次，不了解局部的精细结构，我们对复杂系统整体的认识只能是直观的猜测性的笼统的，缺乏科学性。没有整体观点，我们对事物的认识只能是零碎的，只见树木，不见森林，不能从整体上把握事物解决问题。科学的态度是把还原论方法和整体论方法结合起来，形成一种适合复杂性科学研究的新的方法论：融合论。这也是科学方法论的“正—反—合”辨证发展的逻辑。

二、微观分析与宏观综合相结合

我们知道，整体或系统是由局部或子系统构成的，整体统摄局部，局部支撑整体，局部行为受整体的约束支配。要了解一个系统，首先要进行系统分析：一要弄清系统由那些组分构成；二要确定系统中的元素或组分按照什么方式相互关联起来形成一个统一整体；三要进行环境分析，明确系统所处的环境和功能对象，系统和环境如何互相影响，环境的特点和变化趋势。而所谓微观分析，就是将一个整体或系统分解为局部、子系统或要素，以期对之进行条分缕析的彻底研究。它是在对事物进行研究时，把整体分解为部分，或把高层次的物质分解为较低层次的物质。所谓宏观综合是指在对系统或整体进行了“庖丁解牛”式的微观分解之后，为了获得对事物或系统的整体理解，我们又将微观的局部、子系统或要素分析串连、整合起来，以获得宏观系统的性质，也就是说，宏观综合是指利用微观还原分析的方法，达到对部分的充分认识，获得关于部分的足够知识，然后在此基础上，把对关于部分的知识进行综合以达到对整体的认识，从而获得整体的知识。因此，描

述复杂系统应包括描述宏观整体和描述微观局部两方面,需要把两者很好地结合起来。在系统的整体观对照下建立对局部的微观分析,综合所有微观分析以建立关于系统整体的描述,这是复杂性科学的基本方法论。

复杂性科学中为什么要微观分析和宏观综合相结合呢?我们知道,简单系统的元素同系统整体在尺度上的差别还构不成微观和宏观的差别,如机器系统的元件与整机一般都属于宏观对象。但复杂系统出现了微观同宏观的划分:元素或基本子系统属于微观层次,系统整体属于宏观层次。系统的最小局部是它的微观组分,最基本的局部描述就是对系统微观组分的描述。任何系统,如果存在某种从微观描述过渡到宏观整体描述的方法,就标志着建立了该系统的基础理论。对于简单系统,它的元素的基本特性可以从自然科学的基础理论中找到描述方法,对其元素特性的描述可进行直接综合,即可得到关于系统整体的描述。对于简单巨系统,也具备从微观描述过渡到宏观描述的基本方法,即统计描述。对于复杂系统,由于其存在的复杂性,至今尚无有效的统计描述,也许并不存在这种描述方法。但是,由于复杂系统是由子系统数量巨大,层次众多,关联紧密,对于这样的复杂系统,如果我们仅仅从整体上进行把握,是不可能对系统的结构、功能、演化机制、控制方式等有一个细致的了解。要对复杂系统进行分析,我们必须打开复杂系统这个“黑箱”,进行多方面的微观解剖分析。

认识部分肯定对认识整体有贡献,因为部分是整体的组成部分。例如,对细胞的功能和结构认识清楚了,那么关于人体的知识也就增加了。但是,如果我们仅仅停留在对复杂系统的微观分析,那也就落入还原论的窠臼。早期的系统论研究正是如此,因此,最后停步不前。在用还原论的方法对复杂系统的解剖过程时,往往没有考虑子系统之间的关联,由此得到的微观分析往往与现实产生很大的出入。对复杂系统仅仅做还原的微观分析是不够的。从哲学上来说,复杂性范式的总特征就是它对还原论的反动,还复杂世界本来的复杂面目,把复杂的事物当作复杂性来处理。因此,我们在对复杂系统进行微观分析的基础上,必须进行反向的宏观综合。

如何由微观、局部的认识获得整体、系统的认识,是宏观综合所要解决的问题。分析—重构方法用于系统研究,重点在于由部分重构整体。重构就是综合。首先是信息(认识)的综合,即如何综合对部分的认识以求得对整体的认识,或综合低层次的认识以求得对高层次的认识。综合的任务是把握系统的整体涌现性。从整体出发进行分析,根据对部分的数学描述直接建立关于整体的数学描述,是直接综合。简单系统就是可以进行直接综合的系统。简单巨系统由于规模太大,微观层次的随机性具有本质意义,直

接综合方法无效,可行的办法是统计综合。复杂巨系统连统计综合也无能为力,需要更复杂的综合方法。

三、定性判断与定量描述相结合

任何系统都有定性特性和定量特性两方面:定性特性决定定量特性,定量特性表现定性特性。只有定性描述,对系统行为特性的把握难以深人准确。但定性描述是定量描述的基础,定性认识不正确,不论定量描述多么精确漂亮,都没有用,甚至会把认识引向歧途。定量描述是为定性描述服务的,借助定量描述能使定性描述深刻化、精确化。定性描述与定量描述相结合,是复杂性科学研究的基本方法论原则之一。

成功应用定量化方法的系统理论表明,首先要对系统的定性特性有个基本的认识,然后才能正确地确定怎样用定量特性把它们表示出来。即使被公认为最定量化的学科,至少它的基本假设是定性思考的结果。要建立定量描述体系,关键之一是在获得正确的定性认识基础上如何选择基本变量。例如,普利高津经过长期观察思考非平衡态的物理系统,首先定性地理解了自然界的各种“活”结构或形态只能在系统远离平衡的条件下自发产生出来,而后,进一步理解了这种大自然的创造性必须以某种方式,以及与平衡态的距离联系起来,把这种距离看做描述自然的一个新的基本参量,最终找到定量地描述耗散结构形成演化的科学方法(许国志,2000:31-39)。

自牛顿成功地用数学公式描述物体运动规律以来,定量化方法越来越受到重视,获得极大发展;定性方法被当作科学性较差的、在未找到定量方法之前的一种权宜方法。这在系统科学中(特别是早期)也有反映。但随着系统研究的对象越来越复杂,直至现在的复杂系统,定量化描述的困难越来越严重了。复杂性科学要求重新评价定性方法,反对在复杂性科学中片面地追求精准化、数量化的呼声越来越强烈。就是说,那种不能反映对象真实特性的定量描述不是科学的描述,必须抛弃。

对定性判断与定量描述相结合的原则认识最早、阐述最全面的是钱学森。他在研究开放的复杂巨系统的方法论时,提出了从定性到定量的综合集成法。这也是钱学森领导的系统学讨论班对复杂性科学所取得的主要成果。20 世纪 80 年代初,他针对军事系统研究,提出将科学理论、经验和专家判断力相结合的半理论半经验的方法(钱学森,1988:2)。此后,从 1986 年起,在他指导的系统学讨论班上,又开始了新的探索。他在社会系统、地理系统、人体系统、军事系统 4 个复杂巨系统的研究和实践的基础上,于 1989 年提炼、概括和抽象出了开放的复杂巨系统及其方法论,这就是从定性到定

量的综合集成法(Meta-synthesis)(钱学森,2001:196-212)。

在社会、地理、人体、军事等复杂巨系统的研究中,通常是科学理论、经验知识和专家判断力(专家的知识、智慧和创造力)相结合,形成和提出经验性假设(判断、猜测、设想、方案等)。在自然科学中,这类经验性假设往往是用严密的逻辑推理和精确的物理、化学、生物实验来证明这些判断、猜想的正确与否。但在复杂系统中,这些经验性假设不能完全用这样的科学方式加以证明,否则就不是复杂系统问题了。另一方面,通过定量研究进行精确论证,又使我们不能满足于一般的定性描述和思辨方法,尽管这种定性研究也是需要的和重要的。那么,出路在哪里呢?现代计算机技术以及基于计算机的知识工程、专家系统、人工智能和信息技术等的发展,为我们开辟了新的途径。这个途径就是人—机结合,实现人机优势互补,直到人机融合。我们可以根据系统的观测资料(统计数据和各种信息资料),建立起包括大量参数的模型(这就要充分利用现代数学工具和各种建模方法),而这些模型也必须建立在对系统的实际理解和经验上,以保证模型的合理性和精确要求,经过计算机仿真、实验和计算获得定量的结果。同时充分利用知识工程、专家系统等人工智能技术、信息技术,实现以人(专家体系)为主,人—机结合的知识综合集成,这里包括了科学的和经验的知识、定性的和定量的知识、理性的和感性的知识,通过人—机交互,反复对此逐次逼近,实现从感性到理性、从定性到定量的转化,达到定量认识,从而对经验性假设的正确与否作出明确的结论,这样的结论就是现阶段对客观事物认识的科学结论(王寿云等,1996:56-67)。

当然,一个方面的问题经过这种研究,有了定量的积累,又会再上升到整个方面的定性认识,达到更高层次的认识,形成又一次认识的飞跃。在这里,人—机结合和融合,实际上是人脑信息加工与计算机信息加工的结合和融合。从思维科学角度看,人脑的逻辑思维是微观的和定量的信息加工方式,而形象思维是宏观和定性的方式,创造性思维则是逻辑思维和形象思维的结合。计算机在逻辑思维方面可以给人以很大的帮助,但在形象思维方面,目前计算机还帮不上什么忙。人—机结合始终是以人为主,期望完全靠机器自动求解复杂系统问题,是行不通的,这也可能是 SFI 科学家们困惑的原因所在。

四、认识理解与实践行动相结合

突变论创始人托姆认为,如果说整个科学活动可以比作为一个连续进行的过程,那么我们有理由认为,这一连续过程具有两个极。一个极代表纯

粹的知识，就这点来说，科学的基本目标是理解现实。另一个极涉及行动，按这种观点，科学的目标是对现实采取有效的行动。可能有这样的情况，我们对它已经有非常透彻的理解，然而却无力对它采取任何行动。反过来，有时我们对现实世界能够采取有效的行动，但对其所以有效的原因却茫然不知。相应于这两种对科学认识所持的相反观点，存在两种不同的方法论："行动"说在本质上是解决局部的问题；而"理解"说却试图要找到通用解(也即整体解)。明显的矛盾是，求解局部问题需要使用非局部手段，而可理解性则要求将整体现象化为几种典型的局部情况，由于这类局部情况具有使人明了的特点，因而很快就能为人们所理解。事实上，在采取一种行动时，总有一种超出现象的目标，因为人们总力图使某种不会自发出现的事有可能发生。突破时空的限制，这就是人类最终的目标，对易于控制的非局部行动的一切模式，都应加以利用。正是这一点迫使人们踏上人生的旅程，发展各种技术工具，创办各类事业。反过来，从纯粹思维的角度来考虑，可理解性要求将现象化为直接可以理解的若干要素。复杂性科学中常常存在这两种情况。例如，分形的计算机仿真对要仿真的对象一开始只能是以一定的算法进行"试错"，经过多次试错后，我们才能迭代出与原型相似的模型，然后进一步寻求理论的普适性解。复杂性科学的方法论目前比较强调行动说，这在我们还不认识或者还认识不清的对象探索中，首先是必要的，复杂性科学的对象是极其复杂的，这要求研究者必须保持一种积极的"试错"心态，而不能苛求在全部理解后，再行动。当然，行动最终是要为理解服务的。这就是理解与行动相统一的方法论原则。

五、科学推理与哲学思辨相结合

科学理论是具有某种逻辑结构并经过一定实验检验的概念系统，科学家在表述科学理论时总是力求达到符号化和形式化，使之成为严密公理化体系。但是科学的发展往往证明任何理论都不是天衣无缝的，总有一些严重反常的现象和事件出现，这时就必须运用哲学思辨的力量，从个别和一般、必然性和偶然性等范畴，以及对立统一、否定之否定规律来加以解释。

科学哲学家库恩(2004:73)认为："特别在公认的危机时期，科学家们必须转向哲学分析，作为解开他们的领域之谜的工具"。复杂性科学中充满了各种迷团，不能不求助于哲学分析。为经典力学中新发现的异常复杂现象所困扰，彭加勒转而研究科学哲学，思考必然性与偶然性、决定论与非决定论的关系。这就使彭加勒早于同代人认识到，决定论是拉普拉斯造成的一种幻想。面对直觉、经验与权威理论之间的冲突，洛仑兹深入科学哲学的核

心思想中寻找产生问题的根源,通过清算气象学传统理论中的拉普拉斯决定论,为科学概念上的突破扫清了道路。芒德勃罗的脑海里经常翻腾的是这样一类问题:奇形怪状有什么意义?维数的本质是什么?简单性能否产生复杂性?通过静心思索这些哲学味颇浓的问题,他摆脱了欧几里得以来统治几何学的权威思想,走上发现分形之路。埋头从事数值计算的费根鲍姆,同时也在思考客观性、普适性,有序与无序、物理事实与主观感觉的关系以及宇宙观之类的问题,因而发现的复杂性出现某种普适常数(苗东升,刘华杰,1996:127-149)。

每当新的科学事实与权威理论之间发生尖锐冲突而导致科学危机时,科学家们就会表现出两种截然相反的态度。一些人尊重客观,承认新事实,敢于修改原有理论,并创立新理论去解释新事实。一些人尊重权威,从维护既有理论出发去取舍事实。两种态度反映出两种基本哲学信念的对立。复杂性科学的拓荒者们继承了自然科学的唯物主义传统,一旦确认了与经典理论相矛盾的新事实,便毫不痛惜地抛开经典理论的脚手架,全力建构新的理论以说明这些事实。而他们的同行中总有一些人,虽然也碰到过复杂性的某些现象,甚至更早些,但绝不承认它们是新的科学事实,没有发现理论的自觉性,结果让它们从身边溜掉了。例如,在洛仑兹发现混沌现象之前,日本的博士生上田皖亮就曾发现过,但他的导师们因不相信而压制了,因此错过了重大发现机会。如果日本物理学家们多一点唯物主义,多一点对客观事实的尊重,放下权威的架子,认真核查、思索一下年轻学子上田君的新发现,他们也就不会压制上田,混沌发现史就得重写了(苗东升,刘华杰,1996:127-149)。

每一位学者在走上科学舞台之前都经过长期的科学教育和训练,不但接受了科学知识,而且还接受了思维方式、工作方法、研究风格以及许多并未言明的假设和成见。如果他所在的工作领域之一还处在发展时期,这些继承过来的东西对他作出成绩是大有好处的。如果他恰巧赶上这个领域的革命来临时期,那么,从传统教育和科学共同体中接受的这些东西将成为他实行观念上的革命转变的严重的障碍。要在科学急剧转变时期走在前头,就必须破除传统的束缚,解放思想,更新观念。谁先完成这种转变,谁转变得彻底,谁就容易在创建新科学的竞争中捷足先登。沃尔德罗普(1997)在《复杂》一书列举出有关这一点的大量生动事例。复杂性科学的创立者们无一不是在经典科学教育下成长的,许多人在传统科学研究中曾有过杰出成就,甚至获得过诺贝尔奖。在最先碰到复杂性现象时,他们同样是按照自己熟悉的理论和方法去处理的。但他们的思想一点也不僵化,能够从不太严

重的失败中迅速觉醒，率先完成了科学思想、研究方法和工作作风的转变。一些初期曾拒绝过复杂性这个新概念的学者，在他们皈依复杂性思想之后，曾总结过他们失误的原因。从这些人的谈吐中看到，他们与那些赶在前面的学者相比，差距正在于传统观点太牢固，因而思想转变慢了一点。可以打这样一个比喻：复杂性好比一位围着粗丑面纱的美女，80 年代以前多数人把她拒之门外，当少数人撕开面纱的一角，揭示出美女娇嫩的肌肤时，科学界震动了，个个来了激情，对于复杂性美女趋之若骛，决心一睹风采。当然，首先受到青睐的是那些勇敢地撕面纱的人，这足以让多数科学家嫉妒了。开拓者们何以知道粗丑面纱后竟是美女呢？他们凭的是洞察力、深刻的哲学智慧。哲学在科学中似乎经常是无用的，然而它有“无用之用”，即至用，它将引导科学家提前进入新的境界，发现新领域，革新旧方法（苗东升，刘华杰，1996：127-149）。

摆脱传统偏见并非易事。一般来说，一个人对传统科学贡献越大，对传统的研究方法、风格越熟悉，就越难于转变。这就需要学习哲学，树立哲学思考的自觉性，培养哲学洞悉力，练就一双猫头鹰的眼睛。当碰到理论困难时，能自觉地从具体的科学问题中跳出来，从哲学的高度审视问题，找出症结。从科学史上看，对于一个尚未开拓的研究领域，那些致力于拓荒和创业的学者都有浓厚的哲学兴趣，努力从哲学上为自己的大胆探索寻找精神支持和方法论启示。他们特别感兴趣的是有关强调认识能动性和有助于克服两难困境的辩证思维。复杂性科学目前的情况与此类似，当然，哲学思辨方法不能代替其他科学方法，哲学思辨一般只能作为补充方法和在前思考出现，并且在科学之后进行反思。

第四章
复杂性科学的研究方法

在上一章中,我们论述了复杂性科学需要超越传统的还原论和整体论,创立适合复杂性科学的新方法论:融贯论。为了贯彻这种新方法论,我们还提出了五条方法论原则。但是要把这些方法论原则贯彻到复杂性科学中,还需要把这些方法论原则转化为具体的科学研究方法,并体现到复杂性科学的各个研究领域中。为此,我们在这一章将重点讨论复杂性科学中究竟采用了哪些新的科学研究方法,以体现上章提到的新方法论和方法论原则。我们将这些新方法归纳总结为:隐喻、模型、数值、计算、虚拟和集成等六种具体的复杂性科学方法,并对它们分别进行探讨。

第一节　复杂性科学与隐喻方法

在传统学科中,隐喻和类比实际上也有着重要的作用,但在传统的科学方法论中,往往只论述类比,而忽略了隐喻,不过新近对隐喻的认识论和方法论意义开始逐渐被重视起来(郭贵春,2004:92-101)。在传统科学研究中,隐喻虽然很重要,却一般不被公开承认,也许害怕被怀疑为用非科学的手段来研究科学。复杂性研究者特别是霍兰,不仅公开承认隐喻方法在复杂性科学中的作用,而且特别强调它的重要性。

一、作为文学表现手法的隐喻

在文学作品中,比喻是常见的表现手法,其中比喻又分为明喻和暗喻。隐喻,其对应的英文为 metaphor,实际上就是文学中使用的暗喻手法。据 *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary* 第 9 版解释,隐喻(metaphor)一词在中世纪法语中写作 metaphore,它出自拉丁语 metaphora,而拉丁语出自希腊语同一词汇,原意为转换、变化。英语词 metaphor 出现在 1533 年,意指一种修辞格(a figure of speech),在该修辞格中,在字面上指称一种类型的客体或观念的一个词或词组被用来代替另一个词或词组,从而暗示它们之间的相似(likeness)或类似(analogy,亦译为类比)(李醒民,2004:24)。从词源学的角度考察,英文词"metaphor"源于希腊词"metapherein","meta"的意思是"超越"(beyond),"phorein"则有"提供"、"带来"(to bring)等含义。《牛津哲学词典》认为,隐喻是最重要的一种修辞格式,其中有关话题(意旨)被一种用于非字面意义描述的语词或句子来指称;在一种典型的隐喻用法中,"相关特征的结合成为不合逻辑和荒谬的,但是理解并不因此而失效"(Simon Blackburn,1996:240)。

亚里士多德在其《诗学》中对隐喻下了一个定义:"隐喻就是把一个事物的名称转用于另一个事物,要么从种转向类或由类转向种,要么根据类比关系从种转向种"(1995:1457b6-9)。德国哲学家卡西尔(1988:105)把隐喻视为"以一个观念迂回地表述另一个观念的方法",他对隐喻做了这样的界定:有意识地以彼思想内容的名称指代此思想内容,只要彼思想内容在某个方面相似于此思想内容,或多少与之类似。在这种情况下,隐喻即是真正的"移译"或"翻译",它介于其间的那两个概念含有固定的和互不依赖的意义。在作为给定的始端和终端的这两个意义之间发生了概念过程,导致从一端向另一端的转化,从而使一端得以在语义上替代另一端。麦克格拉斯(2000:185)的定义言简意赅:"隐喻是一种言说方式,言此而意彼。"他还引用了纳尔逊·古德曼关于隐喻的一句名言:"教老词玩新把戏之事"。

隐喻最简单最一般的句法形式是主谓结构的"S 是 P",例如"世界是一团永恒的活火"、"人是机器"等标准形式的隐喻陈述句,通过"是"构成 S 与 P 的同一关系,从而创造出隐喻的张力结构。一个完整的隐喻往往由"本体"S 和"喻体"P 两部分构成。有时,隐喻本体不在场,只有喻体出现在句子中,即 S 常常在语形上缺席(郭贵春,安军,2002:38)。

本质地讲,隐喻是以一定语形为载体,在特殊的语用语境中生成的一种语义映射。正是特定语境中语形、语义、语用的统一,决定了相关隐喻的生

成及其本质意义。一个隐喻的有意义的实现是通过相关语境的选择性和规定性所保证的,包含了"隐喻术语的指称对象、谓词外延和函项的功能选择",并且生动地展示出了"语词的浅层语境与深层语境、形式语境与意义语境之间的跳跃与变换"(郭贵春,安军,2002:43)。

法国哲学家保罗·利科(2004:13-21)在其全面论述隐喻的专著《活的隐喻》中,认为隐喻有四个特点:①隐喻是涉及名词的某种东西;②隐喻要按照活动来定义;③隐喻是名词的转换,要根据名词的偏离来定义;④在名词转移这个概念保留隐喻意义的统一性的同时,与在后来的分类学中占支配地位的分类的特点相反,以后的定义勾画了隐喻的类型学的轮廓。他认为,隐喻是一种借用,借用的意义与本义相对立,也就是说,它原来属于某些词。我们求助于隐喻来填充语义的空白,借用词取代了并未出现的本义词,如果这种词存在的话。

正如英国诗人艾略特所说,隐喻不是什么写作技巧,而是一种有效的思维方式:"这种思维方式提高到某一高度就能产生大诗人、大圣人和神秘主义者。"这是由于隐喻是在不同的存在、不同的经验世界之间建立对等关系,因此隐喻的思维方式不是一种在时间中的持续状态,而是一种同时性状态或空间形式。隐喻的语言和思维方式既利用了时间又否弃了时间,建立了永久的同时性和空间形式,即建立了永恒。隐喻与空间相关,线性的逻辑的叙义语言则与时间相关(李醒民,2004:27)。由此可见,隐喻的本质特征是:它基于相似性或类似性,在不同的经验世界或观念世界之间建立对照关系或对应关系。隐喻的实质在于,我们用一种熟知的对象和境况的语词隐喻地去谈论另一种不熟知的东西的图像,为的是力图把握它和理解它(李醒民,2004:24)。

二、隐喻的科学方法论地位

传统隐喻研究在当代发生了巨大变化,在某种意义上可以将之称为一种转折或转向。因之,当代的隐喻研究体现出了全新的时代特色。在本体论上,隐喻的地位被大大地提高,人们已经从一种语言修辞现象上升到认知和思维的一种内在的、本质性的结构层面上来重新发现和认识隐喻;在认识论上,隐喻不再被看作仅仅具有文学意义上的审美功能,它所特有的科学认知功能也逐渐被揭示出来;在方法论上,隐喻研究被置于更广阔的研究视域内,跨学科的研究方法被广泛采用(郭贵春,安军,2002:36)。

西方科学的传统是追求逻辑性和明晰性,最好是能够被数学化和公理化。逻辑实证主义认为,科学必须能够被证实,凡是不能被清晰表达,也就

是不能被逻辑化被实证的东西，都属于无意义的形而上学，因而必须排除在科学之外。以波普尔为代表的批判理性主义也认为，科学必须能够被证伪，凡是不能被证伪的东西都不是科学，因而必须被排挤在科学的大门之外。隐喻是小说、诗歌等常用的方法，所得结论也往往不能被证实或证伪，因此这些方法是不被传统科学所认同的。然而，这种泾渭分明的科学划界标准并被一致认同，那种将科学和非科学截然分开的企图似乎越来越难于做到（Ted Fuller & Paul Moran，2002：50-71）。

科学理论陈述中隐喻语言的使用，是当代科学哲学家所研究的重要课题，他们一般都把隐喻视为描述科学理论构成要素的一种有启示性的范式。同时，隐喻问题也日益引起科学家群体自身的广泛关注。包括达尔文和爱因斯坦等在内的许多大科学家，都曾明确指出隐喻是一种可用于“逼近”和交流复杂科学概念的方便语言工具，其使用对于科学理论的构造和发展具有相当的重要性。科学修辞学的研究发现，科学理论陈述中一些重要的核心概念往往都是隐喻性的，而且这些隐喻概念被科学家作为新的科学事实和概念的前瞻性发现的重要工具而被使用。表面上看，隐喻语言与追求逻辑严密和可证实性的科学理论语言似乎背道而驰，但事实上并非如此。科学家们往往在科学理论的陈述中自觉或不自觉地广泛应用了隐喻语言和隐喻性思维的方式方法。正是在这个意义上，英国科学哲学家玛丽·海西（Hesse，M.）提出了“一切语言都是隐喻性的”的著名论点（郭贵春，安军，2003：1）。

科学“修辞学的一个很显著的特点就在于它关注对前景的构设。而在这种构设中，隐喻具有着重要的作用。在这个意义上，隐喻似乎成了整个非文字设计集合的提喻法”（郭贵春，安军，2003：2）。隐喻在修辞学的意义上广泛而深刻地渗入到科学理论的陈述中，为其意义的确定和发挥、理解和交流提供了新的语言策略，大大深化了科学理论修辞学劝导及战略构设的灵活性和主动性。事实上，尽管隐喻语言是一种非字面意义、非逻辑的语言，它不可能在逻辑实证主义的意义上得到“证实”，但它却对科学概念及范畴的重构（再概念化）、新的理论术语的引入乃至整套科学理论的构建和发展，发挥着重要的不可替代的作用。科学史的发展有力地证明了这一点，众多具体的科学理论文本也为此提供了活生生的证据。正如同在日常语言或文学语言中一样，科学理论陈述语言中同样大量地存在着隐喻。一个著名的例子是，达尔文在其划时代的科学巨著《物种起源》中，使用了大量借自经济学术语的隐喻概念，如“分配”、“丰富”、“稀缺”、“竞争”等。这些隐喻概念不仅提供了一组描述自然选择的适当词汇，同时提供了一种便于理解和解

释的概念框架。达尔文对此的说明是:"每个人都理解隐喻表达的意义,它们是为了表述的简洁所必不可少的。"(郭贵春,安军,2003:2)不少科学家已经达成共识,认为隐喻是创造性思维的工具,不仅是科学活动合理的产物,而且有助于新的科学理论的创生(郭贵春,安军,2003:2)。

科学理论应该也必须具有某种适度的弹性和模糊度,以保有其预言性和开放性。隐喻语言的使用,成功地弥补了纯由形式逻辑词汇构造的理论语言"僵硬"、"封闭"的缺陷,极大地拓展了科学理论陈述所提供的意义空间(郭贵春,安军,2003:3)。隐喻思维是一种形象思维,但它是逻辑思维的起点和中介。

美国圣菲研究所把隐喻当作一种科学研究方法而引入复杂性科学中,成为复杂性科学的重要方法。George A. Cowan 和 David Pines 说:"隐喻通常被用来表达关于实在方面的描述观,其中大多数情况是指称心、脑、图像和遗传性,其词汇倾向于来自生物学、生物化学和心理学。更定量地说,研究者使用一套数学公式,以表达运动物体的轨迹和物体集体的统计学。"(Cowan,1994:709)

美国圣菲研究所的霍兰十分重视隐喻在复杂性科学研究中的作用,他认为隐喻是创造活动的核心,运用隐喻所产生的结果是创新,它让我们看到了新的联系,并将在未来的复杂适应系统研究中起着关键性的作用。他说:"丰富的隐喻和类比,是创造性科学和诗歌的核心。"(霍兰,2001,中文版序)

> 一旦我们注意到隐喻包括源事物和目标事物,就可以将科学创新中关于模型应用的讨论同隐喻的构造联系起来(应该指出的是,这里所使用的"隐喻"一词是广义的,在某些特例中也包括"明喻"和其他的"比喻")。即使像"冰山,海上的绿宝石"这样简单的比喻,所反映的也远远超出了它的源事物——绿宝石,和它的目标事物——冰山本身。源事物和目标事物都被置于一个包含内在和关联的框架中。隐喻引起这些关联构架的重组,扩大了与源和目标之间的相互作用,将产生不同的、令人惊奇的、有趣的、感觉很畅快的关联和相互解释(霍兰,2001:226)。

那么,隐喻为什么会越来越取得科学方法论的合法地位呢?它在科学研究活动中有什么样的功能呢?它的作用机制如何呢?库恩把隐喻视为科学认知,尤其是科学革命中概念变革的助产士。内格尔(2002:127-139)后来也探究了隐喻在科学认知中的地位,并注意到它们的共同特征是,把不熟悉

的东西还原为已经熟悉的东西。他就隐喻发表了如下看法:“隐喻,不论是僵硬的还是生气勃勃的,它们的广泛使用是人类发现新经验和熟悉事实之间的相似性。这种深刻天赋的有力见证,这样新的东西由于被归结到已经确立起来的特征之下而得到掌握。不管怎样,人们的确倾向于使用熟悉的关系系统,作为在智慧上借以同化起初陌生的经验领域的模型。他充分肯定了隐喻的助发现价值:理解新旧东西之间甚至是模糊的相似性,这也往往是重要的知识进步的起点。当反思变成批判性的自我意识时,这种理解也许可以逐步发展成为那些能够充当有效的系统研究工具的经过仔细表述的类比和假设。”(李醒民,2004:25)

我们说过,隐喻由本体和喻体两部份组成,霍兰则把它们称为源事物和目标事物。隐喻把源事物和目标事物联系起来,形成一种明暗对照的关系。比如,“冰山,海上的绿宝石”这个简单隐喻中,绿宝石是源事物,冰山则是目标事物。通过这个隐喻句子,源事物和目标事物都被置于一个包含内涵和关联的框架中。隐喻引起这些关联构架的重组,扩大了与源事物和目标事物有关的概念。当所采用的隐喻恰当时,源和目标之间的相互作用将产生不同的、令人惊奇的、有趣的、感觉很畅快的关联和相互解释。

布莱克(Black,M.)1962 年进一步指出:

> 隐喻是这样起作用的,它将辅助主题[源对象]的某些特性作为“相关暗示”作用到中心主题(目标对象)上……这些暗示通常包括中心主题和辅助主题的一种“共有性”,但在适当的情境下,它也可以包括进行比喻的人特意想表达的非自然的暗示……隐喻可以暗示出有关中心主题的一些特征论断,而这样的论断通常是用在辅助主题上的,这样就可以对这些特征进行选择、强调、压缩和重组。(霍兰,2001:226)

用张世英(1999:9)先生的话来说,任何事物都有在场和不在场的两方面,我们看到在场的信息,要能联想到更多的不在场的信息。在隐喻中,作为本体的源事物是在场部分,而作为喻体的目标事物则是不在场的部分,我们要通过在场的本体,联想、推测出作为不在场的喻体(目标事物)的属性。再仔细看看“冰山,海上的绿宝石”这个例子。它虽然简单,却可以帮助我们理解事物的概念。绿宝石给我们的感觉包括深绿的颜色、有一个小平面、硬而易碎、闪闪发光、年代久远、象征着财富、具有远东的浪漫等等。而阳光照耀下的冰山具有了其中的部分特征:发出闪烁的光并且有蓝绿的颜色;另外,在它可见的表面上有尖尖的角和小平台等等。同时,冰山也有自己的特

征：体积巨大、不停地溶化、危险、是北极洲和南极洲的神秘事物，还有已提到的其他特征。

霍兰(2001:226)认为，很难讲清我们对两个对象所形成的概念是如何通过隐喻的连接来改变。对于隐喻的反应，因个人经历的不同而有所差别。对于大多数人而言，隐喻将会激发一长串的联想。如果你曾经见过绿宝石而没有见到过冰山，那么立刻就会对冰山有一个印象，认为它会很美。你知道如果在适当的位置敲击绿宝石上闪闪发光的小镜面时，绿宝石就会破裂，这会让你认为当冰山受到碰撞时也会破裂。甚至可以联想更多：既然绿宝石是财富的象征，那么相应地，冰山就是大海的象征。

“冰山，大海上的绿宝石”是一个并不令人吃惊的简单比喻，但却产生了并不简单的概念转移，而更为精致的隐喻则可以把目标对象置于一个全新的理解。表面看来，我们似乎可以清楚地列出同隐喻相关联的事物完整的表列，然而事实上这是不可能的。无论源事物，还是目标事物的概念都是扩展着的变化着的，两者之间的结合总是要强调某些方面，同时忽略其他方面。隐喻同它所出现的上下文情境密切相关，这种上下文包括了环境问题和观察者的阅历。事实上，在上下文或观察者的头脑中可能还有许多其他的隐喻，这些更清楚地表达了隐喻的内涵。在复杂的相关联的事物中，隐喻进一步使它们之间的相互作用变得更加复杂。埃科(Eco, U.)1994 年这样说过：

> 隐喻是所有事物极度抽象的集合。如果天份和后天的学习就在于将似乎不相关的事物联系起来，并在不同的事物之间找到相似之处，那么在所有的比喻之中，只有最敏锐也最牵强的隐喻能够产生奇迹，并像电影放映时的画面切换一样，给人们带来快乐。而且，如果这种转换之所以产生快乐是因为可以不费力地认识新事物，如同在狭小的空间中放下许多物品，那么隐喻会使我们的思维在不同种类的事物间转换，从而让我们能够察觉整个世界而不仅仅是一个事物。(霍兰，2001:228)

霍兰(2001:228)把隐喻关系存在的条件总结为三条：

(1)存在一个源系统，系统中各元素的相关属性和规则已经建立。

(2)存在一个目标系统，系统中存在规则，也可能存在事实，它们都是难于理解和解释的。

(3)存在从源系统到目标系统的转换，这个转换给出了由源系统的推论向目标系统的推论转换的方法。

隐喻的结果是创新，让我们看到了新的联系。因此，霍兰认为，“对于那

些大量从事创造性活动的人而言，无论从事文学创作还是科研活动，都会同意这样的结论：隐喻和模型的运用是创造活动的核心。进一步研究隐喻和模型的构建会学到一些新的方式，这些方式使我们能够在对支持创新过程的机制所知不多，甚至根本就不知道的情况下，一样能够加快创新过程。”（霍兰，2001：229）

三、隐喻方法与复杂性概念的刻画

作为刚刚兴起不久的复杂性科学，碰到的第一个困难是如何来定义它的关键词：复杂性。复杂性的定义目前不下五十种，事实上几乎复杂性研究者人人心中都有自己的定义。吴彤（2004：5）把复杂性的所有定义分为三种类型，即计算型、多样性型和隐喻型。据他统计，在数十种复杂性的定义中，有十余种定义是采用隐喻的方法来界定的，如蝴蝶效应、分形、人工生命、混沌边缘、自组织临界性、路径依赖、复杂适应系统、报酬递增、适切景观、涌现、生成关联、自相似、模拟退火、奇怪吸引子等等。这也就是说，复杂性科学中广泛地采用隐喻的方法，隐喻方法是定义复杂性的重要途径，复杂性的概念可以用隐喻的方法来进行刻画。人们是通过各种隐喻来构造系统和认识复杂性的。这些就像显微镜的过滤镜头一样，使人们看到了组织不同的系统风貌。隐喻型复杂性概念主要通过比喻、类比等方式来达到表述用精确语言难于表述的复杂事物，用隐喻的概念表达难于言说的复杂现象。

Michael（1999：92-110）列举了一些复杂系统理论的隐喻性概念，这些隐喻能做的是提供一种通向新思想的思路和提供碰到未预料到的或不熟悉的东西时用于类推，他把复杂性科学中的常用隐喻概念及其推论和实际应用列表如下（表4.1）：

表4.1　复杂系统理论的隐喻性概念

隐喻性概念	推　论	实际应用
适应性地形	区域对全局选择	寻求发展的战略
适应性地形	共同发展中的形变	意识到反馈环的存在和各层次利益相关者之间的相互作用
吸引子	被动遵循某一模式的行为	选择机会比试图影响既定事实更重要
模拟退火法	“噪声”会增加创造力	找出噪声、新声音或外界观点中的控制因素

续表

隐喻性概念	推　论	实际应用
模拟退火法	利用“混沌”治理“混沌”(以乱治乱)	一定量的混沌(噪声)对控制群体行为、数据流或信息提取是有益的
分治(patches)	将一个整体分成各自作用的块可能更好	将组织分成保持联系的块
T型原理(Tau)	太多数据流量会导致通道堵塞	限制组织在同一时间内试图接受的变化
有产出可能的关系	抓住今天的每个机遇去争取明天的回报(今天播种明天收获)	抓住每一个可能获得帮助的机会
报酬递增率	知识经济的成分与传统经济是不同的	利用任何可能的机会增加关系网络和社会影响
初值敏感性	长期预测是不可能的	控制从本质上来说是不可行的

复杂性理论所提供的重要隐喻之一就是混沌边缘的概念,活的系统处在其稳定和不稳定的夹缝中,并且处于最活跃和最有效率的状态,即平衡于“混沌边缘”,在这种状态下系统的主体(agent)可以最大范围地利用有产出可能的关系,且互相交换的信息量最大。人们在日常生活中经常发现这样的例子:一个稍显混乱的办公室是一个最有效率的办公室;经济往往在管制比较少的地方最繁荣。混沌边缘本身并不很混沌。

在一个复杂的世界里,战略是一系列监控组织的环境和组织中主体行为的过程,用来观察潜在的吸引子在哪里,并为将来的变化提供激励和资源。也许掌握和控制是不可能的(至少在绝对和总体上是不可能的),但是管理者有能力去影响运作模式,即复杂系统理论所指的“适应性地形”(D. Lane,1995:122-123)。

对可增值知识的辨认的任务可以用搜索地形中的最佳适应点的隐喻来代表,地形起伏不定,有山丘和河谷,它和周围的环境的每一个参与者(雇员、顾客、供应商、执法者、竞争对手等)是共同发展的。考夫曼对起伏地形下的搜索做了一系列研究,发现在适应性比较平均的时候,搜索最好在远离可能性空间的地方开展。但是随着适应性增加,最合适的变化总是与所处的可能性空间的当前地点最接近(Kauffman,1993:304-305)。

在复杂的表面(比如有很多山谷和山丘的起伏地形),系统会陷入不利

区域中(错误的山丘),考夫曼的研究开发了几种"模拟退火算法"的途径帮助组织远离局部的不利区域而向全局的更有利的地方运动。模拟退火法是一种优化过程,它是基于利用类似于温度的方法,将其逐步降低,从而使系统在每个温度上趋于平衡,逐渐陷进很深的能量井里。模拟退火法的一个通常的概念是某一特定的温度系统有时会忽略一些约束变量并采取"错误"步骤,并用此暂时增加能量,明智地忽略某些约束有助于系统避免陷入不利的处境。

退火过程可以被看成是故意将噪声引进系统后观察所发生的事情,这被描述为"混沌控制器"。起初将少量的噪声加入一个系统,混沌控制的结果与直觉正好相反,原因是吸引子域的不同区域对初始状况的敏感程度是不一样的;敏感度在吸引子域的非中心地带较小,在中心是最小的,将噪声加入系统可以使吸引子扩张到最大范围。

在竞赛的隐喻中,尽管过程不一定但场地是确定的,有确定的目标和一组参赛者。在适应性地形大隐喻中,地形本身总是在发生变化,目标、过程和竞赛者只不过是其中的因素,这些因素能影响地形本身的形状,目标是占领一个非区域性的顶峰,而且拟定的顶峰必须不同于竞争对手的。

总之,当我们在实践中碰到我们认为值得去思考和理解的东西时,我们首先在大脑中搜索能类推的东西,这就像是碰到不认识的词就去查字典一样,我们会向导一些其他情况下的类似的现象,也许是自然的也许是人工的,以用于事物、数量和文件的类推——包括我们自己的实践和行动的各个方面——以理解我们所希望理解的东西。上述的复杂性词汇的隐喻意义也许可以帮助我们在碰到问题时提供一些新思路。

四、隐喻方法与复杂适应系统理论

复杂性科学的一个重要内容是对复杂性的产生机制的研究。复杂性从何而来?是从系统的内部,还是系统的外部?传统的看法是来自外部,然而这种看法越来越难于自圆其说。复杂适应系统(CAS)就是试图从系统的内部找到答案。它是霍兰在圣菲研究所成立10周年之时提出来的,并得到了研究所其他成员的积极响应。简单地说,其基本思想可以用一句话来概括:"适应性造就复杂性"。霍兰把系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称主体。所谓具有适应性就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断地"学习"或"积累经验",并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演变或进化,包括新层次的产生、分化和多样性的出现,新的聚合

而成的更大的主体的出现等等，都是在这个基础上逐步派生出来的。由适应性产生的复杂性，即所谓复杂适应系统是一大类十分重要的非常常见的复杂系统。它从一个侧面概括了生物、生态、经济、社会等一大批重要系统的共同特点。

霍兰是怎样构建他这个独特的复杂性理论的呢？霍兰是一个具有宽广知识面，并具有哲学思维和富有诗意的科学家，也是一个运用隐喻方法的高手。例如，他在发明遗传算法之时，就从生物学的遗传、变异等现象中得到启发，通过比喻、类比等隐喻手段，建立起他的著名的遗传算法理论。在构建 CAS 理论时，一开始就用隐喻性的手法写道，像艾滋病一类疾病为何能够摧毁免疫系统？像纽约、东京这样的大城市如何能够不间断地保障食品、医疗、服饰和数百万种居民必需品的供应？为此，他引出了复杂适应系统的概念和思想。复杂适应系统的思想是霍兰从经济、生物和生态等实际系统的隐喻中得到启发而逐渐形成的。系统中的个体一般称为元素、部分或子系统。CAS 理论采用了 adaptive agent（具有适应能力的个体）这个词，是为了强调它的主动性，强调它具有自己的目标、内部结构和生存动力。Agent 这个词本来是经济学中的用语，表示代理人或代理商的意思。霍兰借用这个词，明显地表示，经济系统是他建立 CAS 理论时心目中的主要背景之一。但是单独用主体这个概念，还是无法完全表达出 CAS 理论的丰富内容。因此，围绕主体这个最核心的概念，霍兰又使用隐喻方法，进一步将适应性主体分解为 4 个特性（聚集性、非线性、流通性、多样性）和 3 个机制（标识、内部模型、积木）（霍兰，2000：11-37），通过这几个隐喻性极强的概念作基本元素，以全面描绘出适应性主体（霍兰，2000：41）这个核心概念，由此建立起回声模型并经过计算机模拟而建立起他的复杂适应系统理论（CAS）。下面我们来看看这些特性和机制的隐喻性，以及复杂适应系统理论本身的隐喻性。

聚集（aggregation）（霍兰，2000：11）主要用于个体通过“粘着”（adhesion）形成较大的所谓的多主体的聚集体（aggregation agent）。由于个体具有这样的属性，它们可以在一定的条件下，在双方彼此接受时，组成一个新的个体——聚集体，在系统中像一个单独的个体那样行动。这个具有隐喻性的概念从哪里来的呢？在生物界中，共生现象越来越多地得到重视和研究，近年来，人们发现在一些高等生物体内存在着许多独立的低等生物。这些低等生物完全是独立的个体，按照自身的规律生存和发展。它把高等生物体内的条件当作自己的生存环境，进行着物质、能量与信息的流通和处理。如人体中的线粒体。一方面，它们是完整意义下的独立自主的生物；另一方面，在长期的演化过程的作用下，它们必须也只能在人体内的这种环境中生

存。在社会生活中也有许多这样的例子，例如，个人与社会、雇员和企业等等。聚集这个隐喻性的概念归纳和反映了复杂系统共生共存的行为特征。由于承认了个体的主动作用，也由于克服了在整体和局部之间非此即彼的绝对对立，CAS 理论提供了理解和描述上述现象的新视角。聚集不是简单的合并，也不是消灭个体的吞并，而是新的类型的更高层次上的个体的出现；原来的个体不仅没有被消灭，而且在新的更适合自己生存的环境中得到发展，这也就是"粘着"的意思。

流（flow）（霍兰，2000：23）是指在个体和环境之间以及个体相互之间存在着物质流、能量流和信息流。这些流的渠道是否畅通，周转迅速到什么程度，都直接影响系统的演化过程。自古以来人们就认识到流的重要性，并且把这些流的顺畅当作系统正常运行的基本条件。例如，中医所谓的"气""血"，就是典型。通则健康发展，不通则生百病。越复杂的系统，其中的各种交换（物质、能量、信息）就越频繁，各种流也就越错综复杂。所以，复杂适应系统把带有隐喻性的各种"流"的分析，当作值得注意的重要问题。

标识（tagging）（霍兰，2000：13）是指在聚集体形成的过程中，复杂系统所需要的一个起凝聚作用的旗帜或标志。霍兰把它称为"标识"（tagging），这也是一个隐喻性的概念。我们最熟悉的例子就是，用于召集部队士兵或具有相同政治主张的人群的旗帜。在 Internet 网上，消息的标题会使公告板或会议组的成员连接起来。促进动物进行选择性交配的视觉图案、促进商业上相互作用的商标、标识语和图标等都是典型的标识。在 CAS 中，标识是为了聚集和边界生成而普遍存在的一个机制，它使我们能够观察和领略到以前隐藏在对称背后的特性，并促进选择性相互作用。

在霍兰引进的隐喻性的概念中，"积木"（building block）是最有代表性的一个。积木是几乎每一个人在孩童时代就经常玩的一种游戏工具。通过几块基本的积木块，我们可以堆积出诸如房屋、汽车等各种各样的模型。霍兰把我们孩童时代最熟悉的"积木"也作为一个隐喻性的概念引入到号称科学最前沿的复杂性科学中，用于构建他的 CAS 理论。霍兰把积木隐喻用在 CAS 理论中，当作复杂系统的发生器，"是人们认识复杂世界规律的工具"（霍兰，2000：37）。霍兰举例说，音乐家用几个基本的音乐符号就能写出交响乐等美妙的音乐，而几何学上从几个有限的公理出发就能推导出无数的定理。

至于非线性、多样性和内部模型等概念的隐喻意义，在此我们就不详细讨论了。有了上述几个隐喻性的概念，霍兰又用他那带有隐喻性的"适应"、"分派"等词汇以及遗传算法等构建出个体怎样适应和学习的模型。然后，

霍兰又用隐喻性的“资源”、“位置”、“进攻”、“防御”和“资源库”等概念，构建出著名的“回声模型”，并由此揭示出一般性的复杂适应性原理，即主体系统如何演化、适应、凝聚、竞争和合作，以及与此同时如何创造出多样性和新颖性等，使我们能从简单的规律中综合出复杂的 CAS 行为。霍兰用树的隐喻把复杂适应系统的各种要素组合成一颗树，既形象又贴切（见图 4.1）。总之，在 CAS 理论中，隐喻方法的使用是霍兰取得成功的关键。

五、隐喻方法与涌现理论

在《涌现》一书中，霍兰再次熟练地使用隐喻方法构建出他那著名的涌现理论。他在该书中首先从数字、游戏、地图、西洋跳棋、神经网络等隐喻性

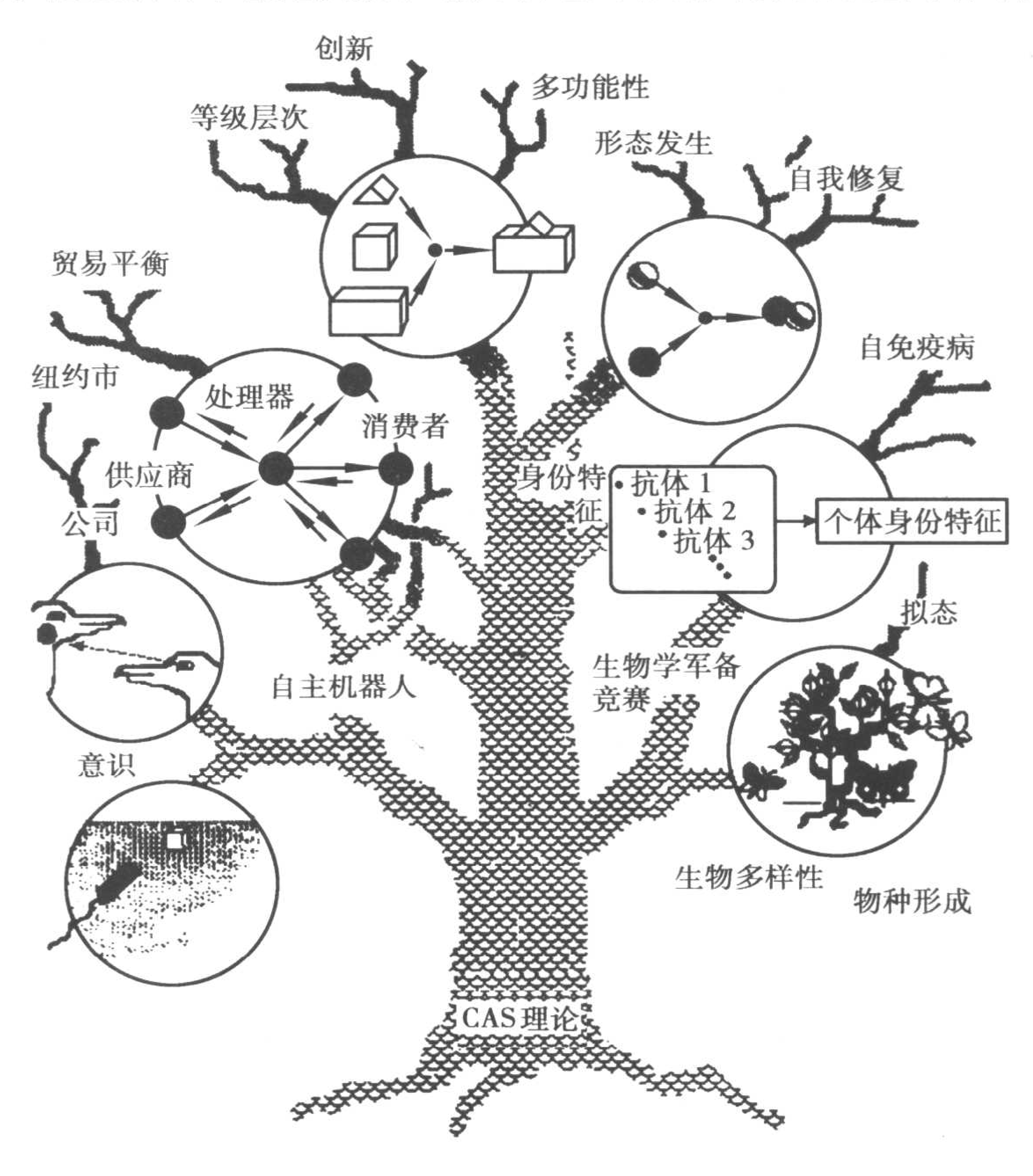


图 4.1　复杂适应系统理论的树型隐喻

资料来源：霍兰，2000：39

概念出发，建立起显示涌现现象的不同系统和模型，展现了它们之间共同的规则或规律，讲述了从蕴涵着规范，能够生成像巨大的红杉和普通的雏菊那样复杂而独特结构的微小种子，到能够通过自学习在西洋跳棋游戏中让设计者一败涂地的计算机；从能够修建桥梁、跨越深沟到驾驭树叶之舟在溪流上航行的蚁群，到诗人充满感情的创作等涌现现象的具体表现。他用具有隐喻性的简单术语——涌现，深入浅出地向我们生动地阐明：涌现的理论能够预言很多复杂的行为，同时也给予我们关于生命、智慧和组织的很多启示。

霍兰对涌现问题的探索是从数字和棋类游戏这两种发明开始的，两者在人类有文明记载之前就已经存在了。它们很容易描述，却并不简单。由它们简短而直接的定义所产生的现象，让我们一直仔细研究到现在，并且成效颇丰。它们很容易地阐释了涌现现象的基本特征简单中孕育着复杂。与此同时我们也提出了一个问题：这样的发明是如何产生的呢？要理解涌现现象，最终就必须先理解创造这些发明的过程。所以，霍兰认为，西洋跳棋和神经网络是研究涌现的两个最合适的隐喻模型。霍兰的涌现理论花了大量的篇幅对这两个隐喻模型进行详细的分析，引进了大量的隐喻性概念和理论。例如，他对西洋跳棋进行了分析，“希望找到由简单规则控制的模型来解释复杂现象”，并认为，对于涌现现象而言，生长出来的复杂性是一个基本思想。如果我们要理解涌现现象，就需要进一步研究这种生长出来的复杂性（霍兰，2001：85）。如何来分析这种生长出来的复杂性呢？他把其看做一颗能够生长的树：

> 我们经常看到树，但是我们看树的方式和看到的树从不相同。每次看到树时，不同的光线、不同的角度都会在视网膜上留下不同的影像。如果考虑细节因素的话，就会看到各种各样不同的树，然而我们很自然地把它们归为“树”。更神奇的是，我们可以很容易地把树进一步分解为“树根”、“树干”、“树枝”和“树叶”。这些积木块以不同的方式组合，从而使我们构建和认识不同种类的树。这有些像孩子们玩的积木，它们都能够以不同的方式组合。正如游戏一样，只有某些组合是合法的，除非我们想构建一棵根和叶倒置的“猴面包树”。有时，为了追求生动或者出乎意料的效果，我们会尝试“不合法”的布局，但那些都是例外，而不是规则。
>
> 在一种隐喻的意义上，我们能够继续使用树的模型，这样就可以把对于树的理解转移到更广的领域中。在讨论对策树时，甚至借助根、叶

的概念,以扩展我们的理解。(霍兰,2001:86)

通过对西洋跳棋这个隐喻模型的详细分析,我们可以看出,霍兰把隐喻方法当作分析涌现的主要方法。他把隐喻方法应用到神经网络的分析中,继续印证他的涌现假设。正是通过西洋跳棋和神经网络的隐喻分析,他提出了涌现的普适理论,认为涌现为“复杂的事物是从小而简单的事物中发展而来的。”“涌现的本质就是由小生大,由简入繁”的受限生成过程(霍兰,2001:2)。

霍兰为什么要选择用隐喻方法来构建其涌现理论呢?涌现现象是自古以来就存在着的普遍现象。日常的一些活动,如耕种,就依赖着涌现的一些基本经验——比如,必须知道影响种子发芽的各种条件。同时,人们的创造性活动,从对企业和政府进行改革到创建新的科学理论,所有这一切也都涉及到受控制的涌现现象。但是它又似乎很难纳入西方近现代科学的分析范式之中,因而变成了一种神秘的似乎似是而非的现象。“这种现象往往带有爆发致富的味道。”(霍兰,2001:3)能够产生涌现现象的都是一些复杂适应系统——蚁群、神经网络系统、人体免疫系统、因特网和全球经济系统等。在这些系统中,构成系统的要素都是具有能动性的适应性主体(agent),“少数规则和规律就能产生令人惊讶的、错综复杂的系统”(霍兰,2001:5),而且整体的行为要比其各个部分的行为复杂得多。面对如此复杂的现象,传统的机械还原的方法由于其一步一步近乎机械化的过程,忽略了想像力和创造力的重要性,因此难于揭示出涌现的奥秘。于是霍兰采用了隐喻方法,因为他认为,“隐喻、类比和模型,引导我们揭开世界上许多复杂的谜团”(霍兰,2001:236),是一种能与诗歌相媲美的创造性思维方法。他相信,“丰富的隐喻和类比,是创造性科学和诗歌的核心”(霍兰,2000:中文版序)。特别是像涌现这样还披着神秘面纱的现象,要真正称为科学研究的对象,并揭示出其中的科学规律,就必须使用具有中国文化意蕴的隐喻方法。

霍兰认为,中国语言文化提供了欧洲语言文化无法比拟的可能性,也就是说中国文化是基于隐喻的文化,而欧美文化是基于规则的文化,比较缺乏隐喻性。因此,他提出,“真正综合两种传统——欧美科学的逻辑—数学方法与中国传统的隐喻类比相结合——可能会有效地打破现存的两种传统截然分离的种种限制。在人类历史上,我们正面临着复杂问题的研究,综合两种传统或许能够使我们做得更好。”(霍兰,2000:中文版序)看来,我们有必要抓住这次复杂性科学兴起的机会,充分发挥我们传统的隐喻文化的特点,在国际上刚刚兴起的复杂性科学中做出我们自己的贡献。

第二节　复杂性科学与模型方法

构建模型,是人类在认识世界和改造世界的实践过程中的一大创造,也是科学研究的最常用方法。人类在制作和运用模型的悠久历史中,积累了很丰富的经验,逐渐形成了具有普遍性的模型方法,所以,模型方法是塑造实在的工具,是科学研究的古老方法(孙小礼,2004:197)。但是,由于综合了还原与整体两种特性,特别是结合现代的计算机技术,模型方法在复杂性科学中也离不开它,而且还要把它发扬光大,形成了自己的特色。因此,复杂性研究者都很重视模型方法的应用。

一、科学·模型·模型方法

在科学研究活动中,给对象实体以必要的简化,用适当的表现形式或规则把它的主要特征描绘出来,这样得到的模仿品称为模型,对象实体称为原型。在地球上所有的生物中,建立起一定的实体或脚本,用以构建模型,这是人类独一无二的行为。模型可能会很小,如古埃及人建立的精美的动物和船的缩微模型,它们也可能很大,像古代独石柱巨大的固定排列那样,能够作为时间流逝的模型。显然,模型并不只是日常某种普遍行为的一部分,它主要来自于某项工作的应用。事实上,我们对于一段路的重要标记和拐角,都形成了一种内在的地图,若不是由于建筑结构或交通路线的变化而不得不找出一条其他路线的话,我们显然是意识不到这个地图的存在的。在我们找出另一条路线的过程中,并不需要验证这条变化后路线的可行性,而是为了要进行真正的实践,即走那条路。模型的重要价值,就在于我们可以不必进行费时费力,而且可能有危险的公开实践,就可以预测到结果。即使是那些比例模型(轮船模型、飞机模型、铁路模型等),也将会使我们得到一些定量的数据,否则要得到真正物体相应的度量值将是十分困难的。我们可以利用轮船模型的比例去决定在真正的轮船上从桅杆顶到第一斜桅顶的距离,可以利用在风洞中飞行的飞机模型得到一些飞行的特征属性。实际上,就像我们在后文中将要看到的,模型在精细实验中是必不可少的。

"模型"这个词的涵义,不仅仅指地图和比例模型,它在某些情况下是这

样使用的(霍兰,2001:13-14):

> 当我们打算建房的时候,首先要调查这一小块土地,要构造模型。
>
> ——莎士比亚(Shakespeare)
>
> (模型是)一个试验性的理想化的结构,被用来作为测试的设备。
>
> ——《美国传统词典》(*American Heritage Dictionary*)

模型的广泛使用在复杂性的研究中发挥了关键作用。建立一个模型需要将要建模的物体和那些与它有着不太明显的相似性的事物联系起来:牛顿方程只不过是写在纸上的——一些符号,看起来一点也不像围绕太阳转动的行星轨道。然而,它们作为一种模型所描述的现实的物质空间,是那些太阳系的比例模型所不能描述的。现在我们更进了一步,通过编制计算机程序,我们可以为现实或想像的情况构建模型。这样的例子遍布从视频游戏到高度细节化的飞行模拟器的许多领域。我们很快将会看到这一切是如何发生的,但现在只是简单地强调一下:最重要的是,模型使预测和预报成为可能。也就是说,建构模型是为了研究原型,客观性有效性是对建模的首要要求,反映原型本质特性的一切信息必须在模型中表现出来,通过模型研究能够把握原型的主要特性。

我们中的大部分人在很小的时候就学会了构建模型。在孩提时期,我们用积木块去具体实现自己的想像——城堡和空间站。熟练地用那些标准物体来重新组合成新的东西,这种技能往往一直延续到我们后来所从事的职业。钟表匠使用熟悉的机械构件,传动轮、弹簧、小齿轮等,去制造能够记录时间的奇妙事物——钟表;科学家则是在一个更抽象的层次上做同样的事情,用简单的事物生成更复杂的事物,如由简单的原子合成分子。通过选择积木块和重组这些积木块的不同方法,我们建立起一些规则,用来创建易于理解的受某些规则支配的系统模型。构思很好的模型将会展现出被模仿系统中的复杂性及涌现现象,但是删减了大量的细节部分。

从某种意义上来说,所有的科学都是以模型为基础的。牛顿和麦克斯韦方程模拟了整个物理世界,我们可以利用这个模型推断出事物发展的结果,并且做出预测。“从模型中可以推断出许多连模型的创建者都没有预料到的性质,有些甚至验证了创始者天才的直觉。”(霍兰,2001:14-15)

事实上,有许多秘密隐含在人们为构建模型所做的努力中。在某种意义上,当人类最初开始构建模型时,秘密就已经成为它的一部分了。考虑得广一点,像地图、游戏、绘画甚至隐喻都属于模型。模型是人类认知行为的精华,它们通常是很神秘的。模型的出现比神父统治时代早期的建模思想

还要早。史前的巨石阵、巨大的昼夜平分预测器,都是权力和神秘的具体体现。

剖析模型和建模过程的神秘因素是非常重要的。建模过程中的非正式描述,就像魔术师常用来分散人们注意力的招数一样,更加深了模型的神秘性。建模和创建某类学科或创造某种艺术形式一样,是一个精细的过程,需要大量紧密联系实际的技巧。要真正领会它,就必须付出与研究音乐、绘画、诗歌或科学等同样多的努力。要想解决模型中的神秘性问题,必须仔细研究建模过程中的每一个步骤。

神秘性表现在不同的层次上,而且每个层次都有其自身的特殊问题。在最基本的层次上:一台仅仅操纵数字的装置是如何模拟西洋跳棋程序和神经网络的？再普遍一些则是:为什么一些类型的过程和系统的建模,比如真正的自学习系统模型,发展得如此缓慢？还有更普遍的:我们希望模型能够从哪些方面帮助我们更好地了解周围世界？最后还要问:为什么各种模型是如此普遍,甚至是人类行为不可缺少的一部分？

虽然我们对基本问题的回答还是相当清楚和易于理解的,但是对于更具普遍性的问题的某些方面,在相当长的时间内可能还要保留一些神秘色彩。我们讨论的神秘性对于大量的模型来说都是很普遍的——地图、建筑图案、比例模型、游戏、飞行模拟器、数学模型、卡通片、隐喻、类比、计谋策略等,这里列举的只是很少的一部分。这些模型的千变万化提出了一个比其他所有问题都更为基本的问题:除了表面上显出的相似性之外,是不是还有些别的东西隐藏在这些不同类型的模型中？

模型时时处处存在,然而人们却是如此无视它们,以至很少停下来想一想它们为何如此广泛,又为何如此变化多端,对我们又有多么重要。在日常行为中,模型就像想像和运动一样普遍,但正是这种普遍性隐藏了它的巨大复杂性。透过熟悉的表面现象,我们必须丢掉那些特殊模型的特质而去抓住其适用所有模型的核心性质。如果能够抽取这些核心特征,就能够将其融合成一个指导我们探索的普适理论。没有这样一个普遍适用的框架,我们的工作将会只剩下分类,就像一个蝴蝶标本收集者那样,只是列出一大堆模型并标出它们的特征。收集无疑是有价值的,但如果我们要想有条理地研究模型,并期望能找到帮助我们认识世界的方法,这样一种普适理论是必不可少的。

二、复杂性科学与模型方法

复杂性科学一般都是在隐喻类比的基础上,建立复杂系统的模型,也就

是说，模型方法在复杂性科学中起着极其重要的作用。为了探索复杂性，科学家们从不同的角度、不同的途径建立了大量的复杂系统模型。凡是在复杂性科学中有所建树的学者都是建模高手。

复杂性科学要超越还原论，为什么也要使用传统的模型方法呢？其实，模型是塑造实在的一种工具，“模型方法乃是现代科学方法的核心”（孙小礼，2004：198）。任何科学研究，无论它是采纳还原论还是整体论的路径，都离不开模型和模型方法，否则就很难称为科学。模型方法也很好地体现了复杂性科学的方法论原则。其实，复杂性科学的研究对象异常复杂，使研究工作面临种种困难。对于一个难于直接下手研究的复杂客体，怎样着手研究，能不能顺利地进行研究，其关键常常就在于能不能针对所要研究的问题构建出一个合适的科学模型。因此，复杂性科学也离不开模型方法。复杂性科学不能总停留在隐喻的层面上，否则就难于成为符合科学规范的科学大家庭的成员。只有上升到模型建构层面，并且真正建立起属于自己富有特色的科学模型，复杂性科学才真正上升到了科学层次。因此，能否建模，有没有成熟的科学模型，是衡量复杂性科学科学性的重要手段。

由于复杂性科学的对象是各种异常复杂的现象，因此，虽然传统的模型方法，例如数学模型，在复杂性科学中也十分重要，但如果没有计算机的参与，复杂系统这个黑箱是难于打开的。计算机成了研究复杂性的重要工具。所以，在复杂性科学中，计算机模型具有特别重要的地位。例如，在研究涌现现象时，计算机模型把棋类游戏、数字和积木块所表现的主题很好地结合为一种统一的思路和方法。为了在计算机上实现模型，我们首先要决定出模型主要的组成部分——模型的积木块，然后在计算机中实现这些组件，形成称为子程序的一系列指令。最后，在计算机中将这些子程序根据相互作用方式组合起来产生一个完整的程序，新产生的程序就定义了这个模型，其结果就是决定模型行为的那些规则依赖计算机得到了实现。

我们也许会觉得很惊奇，各种各样具体的对象和过程居然能通过数字和数字操作表示出来。计算机模型和数学模型都具有这种神奇的能力。例如，我们可以利用数字来模拟飞机的飞行，这种飞行在我们真正熟知的地方，如芝加哥，在特定的天气状况下，如夏天的雷阵雨中进行。这种类型的数字表示已经十分普遍，以至于我们能在家里的计算机上实现飞行模拟。再多一点努力，我们将可以得到完整的工业飞行模拟器。即使是那些有经验的飞行员，在模拟设定的紧急情况下“飞行”时，也会身临其境，异常紧张。这是如何实现的呢？这将是我们在今后的探索中可能遇到，而且必须直接面对和解决的神秘问题。

三、复杂性科学中的几个重要模型

（一）复杂适应系统的回声模型

复杂适应系统(CAS)是美国圣菲研究所霍兰提出的一种复杂性理论,复杂性科学的一个重要方面,是对于复杂性的产生机制的研究,CAS理论就是对这个问题的一种回答。简单地说,其基本思想可以用一句话概括:"适应性造就复杂性"。我们把系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称为主体。所谓适应性就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断地交互作用的过程中,不断地"学习"或"积累经验",并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演变或进化,包括新层次的产生,分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等,都是在这个基础上逐步派生出来的。

霍兰在研究CAS时,就是在隐喻的基础上采用模型方法建构CAS的模型,从而建立其复杂适应系统理论的。他通过选择积木块和重组这些积木块的不同方法,建立起一些规则,用来创建易于理解的受某些规则支配的系统模型:刺激—反应模型。这个模型反映了CAS中具有主动性的主体的基本行为模型,即对个体是怎样适应和学习的理解和描述。他分三个步骤建立起这个微观模型,即:①建立执行系统的模型;②确立信用分派的机制;③提供规则发现的手段(霍兰,2000:42)。

在微观的主体模型的基础上,霍兰开始建立整个系统的宏观模型,他称之为回声模型(Echo model)(霍兰,2000:99)。他在"主体"这个概念之外,又定义了两个新概念:资源(resource)和位置(site)。主体具有最简单的功能——寻找交换资源的其他主体,与其他主体进行资源交流,保存及加工资源。为此,主体要有三个基本部分:①进攻标识——用于主动与其他主体联系和接触;②防御标识——用于其他主体与自己联系时决定应答与否;③资源库——用于储存的加工资源,它的功能包括:主动与其他主体接触,同时也对其他主体的接触进行对答,如果匹配成功则进行资源交流,在自己内部储存与加工资源,如果资源足够,则繁殖新的主体。在此基础上,整个回声模型成为如下情况:整个系统包括若干个位置,每个位置中有若干个主体,主体之间进行交往,交流资源和信息。这就是最基本的回声模型。

这个基本的回声模型还过于简单,无法描述复杂的系统行为,因此霍兰在基本模型的基础上逐步引入了"交换条件"、"资源转换"、"粘着"、"选择交配"、"条件复制"等五种机制,形成了扩展的回声模型。通过这一步步扩

充，回声模型的表达和描述能力不断增强，从而具备了描述和研究各种复杂系统的能力。不难看出，回声模型有着明显的经济、生物、生态领域的背景和影响。所以，CAS 理论的研究并不是纯理论的思考的产物，而是在大量现实的复杂系统的考察与研究的基础上逐步抽象出来的理论模型。圣菲研究所还开发了一种软件——SWARM，以实现模型的可操作性。回声模型展现出被模仿系统中的复杂性及涌现现象，但是删减了大量的细节部分。正是通过回声模型，霍兰清晰地解释了 CAS（特别是基于计算机的 CAS）的重要性质，探讨了 CAS 如何演化、适应、聚集、竞争、合作，以及与此同时如何创造极大的多样性和新颖性等。回声模型是使用很少的原理构建出极其优美的模型典范，为复杂性如何涌现和适应设定了一个路标。

（二）涌现理论中的生成模型

涌现的概念（即整体大于其各部分之和）简单得令人惊讶，然而它在科学、商业以及艺术等诸多领域中都具有极深的寓意。不过，它只是一种隐喻的描述，要完成科学语言的表达，就必须构造出各种科学的模型。在复杂性思想的指引下，霍兰也是在隐喻的基础上不断建构各种科学的涌现模型，从而揭示出隐藏在涌现现象背后的复杂性规律。在对涌现现象进行深入探索的《涌现》这部著作中，霍兰比较了显示涌现现象的不同系统和模型，展现了它们之间共同的规则或规律，讲述了从“蕴涵着规范、能够生成像巨大的红杉和普通的雏菊那样复杂而独特结构”的微小种子，到能够通过自学习在西洋跳棋游戏中让设计者一败涂地的计算机；从能够修建桥梁、跨越深沟和驾驭树叶之舟在溪流上航行的蚁群，到诗人充满感情的创作等涌现现象的具体表现。

霍兰是从简单的棋类游戏、数字和积木模型开始，然后利用地图隐喻和对策论，建立起反映导致结构变化的不变性的规律的动态模型。在计算机的辅助下，通过西洋跳棋的隐喻类比，引入神经网络理论，建立起具有普适理论意义的基于主体的涌现模型（霍兰，2000：175）。最后，通过受限生成过程分析和西洋跳棋程序的解剖，并嵌入遗传算法，霍兰建立了具有可变结构的受限生成过程模型（霍兰，2000：175）。霍兰通过各种涌现模型向我们生动地展现了涌现的理论能够预言许多复杂的行为，同时也给予我们关于生命、智慧和组织的很多启示。

（三）自组织临界性理论的沙堆模型

自组织临界性（Self-Organized Criticality，简称 SOC）是美国布卢克海文

国家实验室的三位物理学家巴克、汤超和威森费尔德于1987年提出来的,用于描述和解释自然界中极为常见的1/*f*噪声谱等复杂行为的概念。所谓自组织临界性指的是一类开放的动力学的远离平衡态的由多个单元组成的复杂系统,能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态,处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似"多米诺骨牌效应"的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统,形成一个大的雪崩。临界性的特征,为处于临界态的系统会出现各种大小的"雪崩"事件,并且"雪崩"的大小(时间尺度和空间尺度)均服从"幂次"分布(巴克,2001:21)。

自组织临界性这个概念也是一种隐喻性的概念,要把它变成科学的概念还必须建立科学模型。他们起初研究耦合摆,后来发现耦合摆的情况对于物理学圈外的人来说不容易理解,他们发现沙堆是更为形象的例子,于是便有了自组织临界性的经典模型——沙堆模型(sand-pile model)。沙堆是我们习以为常的东西,然而巴克却正是从常人忽视的东西建立了反映复杂性演化的模型。

对沙堆模型的数据模拟表明,开放的有多个自由度的远离平衡态的动力学系统在临界态上运作,以阵发的混沌的类似雪崩的形式演化,并能够演化到一个稳定的自组织临界态。空间的标度律导致自相似的分形结构,时间谱则是1/*f*噪声谱。这个模型已经广泛应用于诸如太阳耀斑、火山爆发、经济学、生物演化、湍流以及传染病的传播等现象中。正是通过这个简单的沙堆模型,巴克透视出复杂系统演化的秘密(Per Bak,& Chen Kan,1991:264)。

自组织临界性研究中还有许许多多的模型,比如,生物演化模型(Bak-Sneppen Evolution model)、Bak-Chen-Tang森林火灾模型(forest-fire model)、交通堵塞模型、OFC地震模型等等。模型方法在自组织临界性的研究中占据了非常重要的地位,正是借助于模型,我们才可能理解某些系统的特性。一般说来,自组织临界性模型都较为简化,由于多体问题本身复杂,如果模型过于繁杂就将难于处理。因此,自组织临界性的模型描绘的大多为虽是较为粗粒化的情况,但是仍然能体现物理系统的基本框架、基本图像和最本质的物理机制,具有一定程度上的普适性。

(四)人工生命研究中的人工生命模型

人工生命的研究者们研究人工生命这个复杂现象之时,也是使用模型方法。如兰顿在隐喻性概念——混沌边缘——的基础上,与其他学者一起建立了探索人工生命生成演化的各种模型,如自繁殖元胞自动机、鸟群(Biods)模型、蚁群模型、Tierra模型、Avida模型、"阿米巴世界"等。正是通

过这些模型，兰顿等人发现，生命的本质在于物质的组织形式而不在具体的物质本身；如果我们在某种媒质中创造出产生混沌边缘的条件，那么我们就可能在这种媒质中创造出生命来。人工生命研究的模型描述起来都比较麻烦，这里只简单介绍 Tierra 模型。

1990 年，美国特拉华大学的热带雨林专家 Thomas Ray 编写的 Tierra(西班牙语意为地球)模型轰动了整个人工生命界。Tierra 的不平凡之处不仅在于它第一次是由一位生物学家设计的，而且还在于 Ray 第一个宣称，他的“地球”(Tierra)上的“生物”事实上就是“活的”。Ray 在编写他的模型时试图制造出完全不同于我们周围看得见的生命形式。他说：“这一工作的目的不是模拟生命，而是合成生命”(Ray，1991)。在 Tierra 中，“生物”由一系列能够自我复制的机器代码或程序组成，它在计算机中的复制分别受到计算机的存储空间和 CPU 时间的约束。能有效地占领内存空间和利用 CPU 时间的“生物体”，如果具有更高的适应度，传递到下一代的机会就越大。内存空间、CPU 时间和计算机的操作系统就是 Tierra 的“自然”环境。内存空间相当于自然生命的空间资源，CPU 时间相当于自然生命的食物资源。Tierra 的生物是用汇编语言编写的自复制程序。在 Tierra 中，计算机的 RAM 中由一块专门的空间，这个空间中放置了一个“祖先有机体”，该祖先有机体根据它的汇编程序代码中的指令开始复制代表它的基本生存的代码。随着有机体的数目的增加，RAM 中的空间减少了，因此有机体为了自己的生存空间开始竞争。通过计算机运行模拟，差不多自然演化过程中的所有特征，以及与地球生命相近的各种功能行为组织全都出现在 Tierra 中，并且生物系统所具有的高度复杂性也出现在演化生物高度发达的行为中。在 Tierra 中，开始时的互补交流的生物后来发现了相互利用，以及避免被利用的方法。实验证明，Tierra 模型这个人工生命的计算机模型是比较成功的。这也充分说明了模型方法在人工生命研究中扮演了重要的角色，许多人工生命研究都是通过算法模型在计算机中实现研究的。

四、模型方法在复杂性科学中的特点

复杂性科学是代表 21 世纪科学发展新方向的超越还原论的新科学，而模型方法是科学研究中重要但却古老的研究方法。为什么新科学同样需要这样的“旧”方法呢？为什么复杂性科学要超越还原论却不说要超越传统的模型方法呢？这要我们从复杂性科学和模型方法双方的特点来回答。

（一）模型方法是复杂性科学的重要工具

我们说过，模型是对现实世界或事物的摹写，构建模型既可以在保持系统的完整性的基础上，从系统的外部通过输入输出参数来构建功能模型，也可以打开系统这个黑箱，通过系统内部的结构参数来构建结构模型，因此，模型方法并不是完全等同于还原方法，而是还原论和整体论都会采用的一种科学研究方法。模型能否建构模型是衡量一个学科能否纳入科学的范畴的重要指标。在古代，人们使用整体研究方法来探索自然中的某些现象，但那时还没有能力为这些探索构建出合适的科学模型，所以古代的科学只是哲学的一部分，没有从哲学中独立出来而获得自己的独立地位。只有随着模型方法的成熟，并为对自然的探索建立自己的模型，特别是数量模型时科学才从哲学的母体中慢慢独立出来并获得了独立发展的动力。在近现代的科学探索中，科学家们也经常遇到复杂性现象和问题，但由于没有合适的建构模型的方法，因此，许多探索只能停留在哲学思考的层次上，而不能纳入科学的大家庭中。如今，在其他各种科学研究工具的支持下，我们能够为复杂性现象构建其科学的模型，这就为探索复杂性打开了真正的科学之门（Koperski，1998：624-648）。正因如此，霍兰等复杂性研究者特别重视模型方法在复杂性科学研究中的重要作用，并把模型和隐喻当作创造活动的核心（霍兰，2001：229）。人们虽然并不是现在才遇到复杂性现象和问题，但只有找到为复杂现象建立模型的方法之后，复杂性科学才真正兴起，否则复杂性科学至今还只能停留在哲学思辨的层次上。

（二）复杂性科学拓宽了模型方法的应用范围

约翰·L·卡斯蒂对科学模型进行了分类，根据建构模型的方法，他把科学模型分成4类：实验模型、逻辑模型、数学模型（计算模型）和理论模型，并根据它们的功用分为预测模型、解释模型和规范模型等3类（卡斯蒂，1998：15-19）。孙小礼则把科学模型分为物质形式和思维形式两大类，其中物质形式又分为天然模型和人工模型两类；思维形式又分为理想模型、数学模型、理论模型和半经验半理论模型等4类（孙小礼，2004：198-211）。在传统科学中主要是以数学模型和理论模型为主，然而，在复杂性科学中，由于复杂性要反映系统的过程性、主体性、动态性、开放性、涌现性等特点，为复杂系统而建立的模型也必须反映这些特点，因此，复杂性科学的模型往往就要超出传统科学的模型而形成一些新的模型。为了反映复杂系统的生成性或过程性，复杂性科学的模型往往是过程、动态的模型，而传统科学建立的

则很多属于静态模型。传统科学注重实体，而复杂性科学注重关系，所以在复杂性科学中关系模型居多。我们说过，在复杂系统中，其组成要素往往具有主动性，能够主动适应内外环境，所以复杂性科学的模型也就具有反映主体性的特点，它往往是主体性模型。在复杂性科学中还有许多数值模型、算法模型、虚拟模型、半定性半定量模型存在。总之，复杂性科学的模型反映了复杂性科学的特点，拓宽了科学模型的范围。

（三）复杂性科学中的模型方法一般需要计算机的参与

由于复杂性科学面对的是复杂系统，传统的纸和笔的演算，以及简单的实验设备难于表达和验证其模型的正确性，计算机的参与使这些问题迎刃而解，因此，为复杂系统而建的模型往往都是计算机模型。霍兰在论证计算机模型时说："计算机模型同时具有抽象和具体两个特性。这些模型的定义是抽象的，同数学模型一样，是用一些数字、数字之间的联系，以及数字随时间的变化来定义的。同时，这些数字被确切地'写进'计算机的寄存器中，而不只是象征性地表现出来。……我们能够得到这些具体的记录，这些记录非常接近在实验室中认真执行操作所得到的实验记录。这样一来，计算机模型同时具备了理论和实验的特性。"（霍兰，2001：31-32）正因计算机模型具有这样的特点，所以他认为计算机模型是"一种对涌现进行科学研究的主要工具。"（霍兰，2001：59）复杂性科学的模型，例如霍兰的涌现模型、巴克的沙堆模型、兰顿的人工生命模型等，都是计算机模型，都需要用计算机来实现。

（四）复杂性科学中的模型方法需要定性与定量相结合

面对复杂系统，如果要建立完全定量的数学模型一般是很难做到的。为此，研究者们一般借助于形象思维，在隐喻、类比的基础上建立定性的模型。在定性的基础上，再进一步抽象上升，结合数值方法、计算方法和虚拟方法等，将部分参数数学化和数量化，而有些参数则仍然无法得到纯数量的表达，因此这种仍然是定性和定量的一种综合。在复杂性科学中，我们很难得到在传统科学中的简单而明确的数学模型，取而代之的是有些参数是定性的，而有些参数是定量的。这也就是为什么钱学森先生说，复杂性科学需要采用从定性到定量的综合集成方法的道理。关于这一点，我们将在本章第六节进行详细的探讨。

第三节 复杂性科学与数值方法

数值与科学密不可分，数值方法已经是比较成熟的科学方法。在数学中还有了专门的数学分支：数值分析，科学研究中也专门有了数值方法，并被称为“第三种科学方法”(石钟慈，2000:9)。然而，纯粹靠玩数字游戏来发现新现象，靠捣鼓数值来发现大自然的新规律，似乎只有在复杂性科学中发挥得最淋漓尽致，以至于数值方法成了复杂性科学不可或缺的重要方法。

一、从蝴蝶效应的发现谈起

1961 年气象学家洛仑兹用一台旧计算机对描述天气的简化方程进行模拟仿真，以期实现天气预报的计算机化。有一天，为了考察一条更长的序列，洛仑兹想走一条捷径，于是他没有令整个计算机从头运行，而是从中途开始。作为计算的初值，他直接打入了经四舍五入的所谓上一次的输出结果。然而经过一段时间后，他发现了出乎意料的事：从几乎相同的出发点开始，计算机产生的天气模式差别越来越大，终至毫无相似之处。这就是所谓的“蝴蝶效应”：初始条件的差之毫厘，导致结果的谬以千里！混沌理论这门新学科的种子就这样播下了(格莱克，1990:16)。

洛仑兹之所以能幸运地发现蝴蝶效应，这应归功于他对数值的兴趣以及成功地应用了数值方法。在洛仑兹发现这个蝴蝶效应之前，由于受到牛顿时空观和拉普拉斯决定论的影响，科学家们基本上都相信：只要近似地知道了一个系统的初始条件和理解了自然规律，就可以计算系统的近似行为；近似准确的输入导致近似准确的输出。这一假定实际存在于科学的哲学核心里。就像一位理论家喜欢对学生们讲的：“西方科学的基本思想是，当你试图解释地球表面一张台球桌上一个球的运动时，完全不必考虑另一个星系里某个行星上一片树叶的飘落。极小的影响时可以忽略的。事物的行为方式有一种收敛性，任意小的影响时不会放大成为任意大的效果的。”(格莱克，1990:16)就经典科学的角度讲，近似和收敛的信念是以整个牛顿力学作科学依据的，而且曾起到了重要的作用，比如哈雷彗星的周期运转就是其成功的例证。

洛仑兹起初也相信这种决定论。他把天气的变化用方程组来表示，方程表示不同的风力、风向、温度、气压等参数。为了每个参数能够被他那台很破旧的皇家马克比计算机进行处理，洛仑兹把方程组进行了最大的简化，只用三个比较简单的方程组来反映，所以被人说成了“玩具天气模型”，因为这三个方程组只是保留了其精神实质，也就是说这几个方程虽然简单，但仍然反映了天气预报的精神实质。洛仑兹给方程组赋予初值，然后进行反复运算，让运算结果的数值来反映实际的天气变化。根据牛顿定律和决定论的观念，在物理定律的作用下，世界只要运转起来就不必进一步进行干预。经典科学家们都相信，从现在到将来，运动定律总是实现数学必然性的桥梁，过去、现在和将来都按照牛顿定律在不偏不倚地运行着。正因如此，洛仑兹中途将经过四舍五入的上次的输出结果再次输入计算机进行运算，并确信万无一失，便悠哉离开计算机，等待着自己预计的结果。然而，实际的运算结果却让他难于置信。“蝴蝶效应”就是这样由于在计算机中的数值计算中偶然被发现，混沌理论也由此产生，由此也开创了数值方法在复杂性科学中的重要地位。

二、数值・计算机・数值方法

人们自古就跟数字打交道，对数字有了数千年的认识和使用的历史。从结绳记事开始，人们逐渐认识了各类数字，并能够对数字进行各种运算和分析。人们从数字中寻找各种规律也有了很长的历史。首先是加减乘除四则运算，然后是其他包括微积分等复杂的处理。对随机产生的数字，也有了处理的科学方法，例如，概率统计就是专门处理各种随机数字的技术。可以说数字与人们的生活息息相关，也与科学技术的发展紧密相连，没有数字也就没有科学技术。

人们在掌握了数字的许多规律之后，就建立起反映各种数字参量的方程式，其中包括微分方程。面对这些方程式，人们发现，如果数量之间呈线性关系，处理起来就很简单，因此成为教科书最经典的内容。但是，如果数量之间呈非线性关系，那么处理起来就比较复杂，甚至无能为力。因为我们传统的科学方法主要是建立微分方程，然后是解方程，求得方程的解析解。但是，非线性方程由于其相互作用，基本上无法得到解析解，只有几个特殊方程能够得到。在得不到一般解析解的情况下，科学家有两种方法，一是将非线性方程线性化，但这是一种危险的方法，往往把关键的东西丢失殆尽，因而从方程的解中，根本看不出有什么新质产生。第二种方法是求数值解，通过数据迭代来得到方程的数值解。然而，这项工作特别庞杂艰难，在发明

计算机之前,也只有个别简单的方程能求得数值解。一般的方程在理论上可以求数值解,但因为缺乏有效的计算工具,实际上几乎无法进行。

1948 年第一台数字电子计算机在美国诞生,这是人类认识世界、改造世界的一场伟大事件。它标志着人类对信息处理本质的深刻认识,同时也是威力巨大的计算手段。信息处理原本是人的智能,电子计算机的诞生宣告了对人类只能的机理有了基本的本质性认识,并且实现了人的处理信息的智能可以部分由人造物代替。第一代电子计算机出现后,它的更新换代的速度十分惊人,由原来每秒做数万次运算到现在的微机每秒都能做几百亿次运算,因此原来难于解决的艰难的运算问题便迎刃而解。这样,原来没有办法解决的非线性方程的数值解可以交给计算机去解决,非线性研究由于计算机的出现而有了突飞猛进的发展。由于非线性理论研究的突破,由非线性带来的复杂性问题也就被推到了前台。

由于计算机给数值处理带来革命性工具,因此,最近几十年便兴起了数值实验方法,简称为数值方法。所谓数值方法就是对系统模型进行计算求解,从而把握系统的组成和运行规律。我们说过,这种方法很早就存在着,在其他科学中也早已经有了广泛的应用。但是,在以前的观念中,认为计算并不能发现什么新东西,因而数值方法只是一种辅助性的方法。但复杂性科学用事实改变人们的陈旧观念,复杂性的许多新现象和规律都是通过数值计算发现的,因此也就提高了数值方法的地位。"计算出人意料"——这是复杂性科学中数值计算给人带来的惊讶。洛仑兹的幸运在于他的时代已经有了快速的运算工具——电子计算机,因此他能够成为发现混沌现象的第一人,也成为复杂性科学的先声。

在复杂性科学中,人们处理的一般都是非线性关系。这也不难理解,一般认为,非线性是复杂性产生的根源之一。正是因为非线性,才能产生出复杂的现象。也只有使用计算机,才能把非线性方程真正当作非线性来处理,而不是把它们当作线性来处理,因而丧失混沌等复杂性的机遇,因为"这门新学科正在建立自己把计算机作为实验工具的传统"(格莱克,1990:61),而计算机的实验是以数值计算为基础来进行实验的。由于数值方法发现和处理混沌现象的成功,才让我们认识到数值方法也是科学研究的重要方法之一,特别是处理复杂性的重要方法之一。因此,复杂性科学和数值方法是相互依存的,在探索复杂性科学方法论之时,我们必须对数值方法进行开拓和探索。

三、数值方法与混沌理论

并不是只有洛仑兹成为使用数值方法发现混沌现象的幸运儿，与他一样幸运的还有约克（York，J.）和李天岩、罗伯特·梅（May，R.）以及菲根鲍姆（Feigenbaum，M.）等人，他们的成功基本上都应归功于数值方法。

在20世纪六七十年代，美国数学家约克和他的博士生李天岩共同发现了"周期三蕴含混沌"的（理论）现象（Li and Yorke，1975:985-992）。他们通过对下面的一个迭代函数

$$f_{n+1} = = rx_n(1 - x_n) \quad x \in [0,1] \quad 0 < r < 4$$

的迭代性质的研究，发现了当出现三个周期的时候，任何周期就都可能出现。换句话说，只要有周期三，就可能产生任何的不同周期。上面的函数很早就在生物界的领域里出现了，它是一个非常重要的模型，通常被称为"Logistic Model"，又被称为虫口方程，是一个对虫子的世代演化进行简化研究的抽象模型。关于这个函数的迭代，现在已是举世皆知。但是在20世纪60年代，生物学家们对这个方程的性质并不完全清楚。数学家李天岩和约克通过气象学家洛仑兹的文章（关于大气混沌的研究）发现了在这个迭代方程中的后来被命名为"Li-Yorke定理"的迭代演化规律。当r较小时，如果做$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$这样的迭代，对于（随意）取得x_0，$\{x_n\}$这个数列最后都趋于一个点。但是当r慢慢变大，当它超过3时（注意r的数值为3时发生重大转折），$\{x_n\}$这个数列却走向一对周期二的点。当r再变大，而超过某一个数值时，$\{x_n\}$走向一组周期4的点。然后，随r的逐渐变大，$\{x_n\}$最后会趋近一组周期$2m$的点。但是当r大于某个数值后，却会出现一些"奇怪的现象"。比方说，对于某些r来说$\{x_n\}$最后走向一组周期5的点，对于某些r来说$\{x_n\}$最后趋近一组周期6的点。对于某些r来说$\{x_n\}$在两个迭代之间跑来跑去。尤其当$r = 4$时，$\{x_n\}$这个数列在[0，1]这个区间跑来跑去（梁美灵，林则柯，1996）。

这种现象本身，许多科学家都曾经发现过，但他们都无法解释，连当时生物学界著名的罗伯特·梅也无法解释这个现象，其中大多数人想像这也许只是计算上的误差造成的。的确，在计算上微分方程解的轨道上出现非常不规则甚至混乱的现象，常常被认为是计算方式上的问题，或是计算的误差。因此而时常埋没了一些开创性的工作。而李天岩和约克，在气象学研究以及生物学研究的那些智者启发下，发现了其中蕴藏的"数学"规律。

若是用Li-Yorke定理来解释，这种不规则的混乱现象并不是计算方式的问题，或是计算上的误差所导致的结果。事实上这些混乱现象存在于函

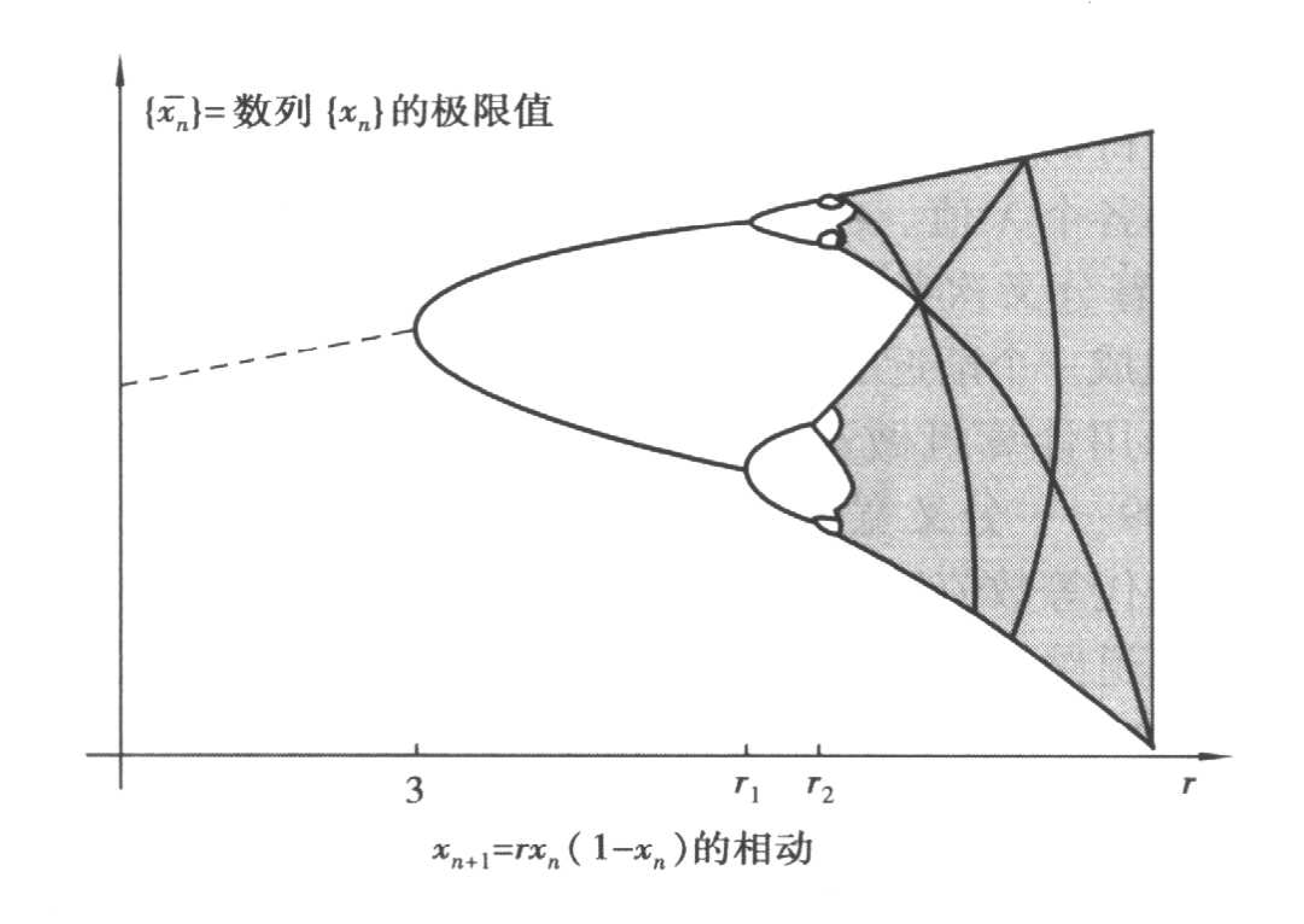


图 4.2　迭代产生的混沌

数本身的特性,并不是人为计算上的错误或误差所造成的。函数本身是对自然界的一种映射,具有"周期三则任何周期都出现"的性质。

一个看似简单、确定并且熟视无睹的函数方程,竟然产生了混乱现象,产生了"乱七八糟"(chaos)的行为,并且有"周期三则混沌"的规律,这的确是让人不可思议!正是 Li-York 的这个惊人发现,才让洛仑兹最早发现的混沌现象成为一门叫做混沌学(chaos)的理论。他们的"周期三则混沌"的文章成为引用率最高的文章,而用数值方法来产生和研究混沌也就成为一种重要的通用研究方法。

在混沌刚刚被发现之时,由于混沌系统的复杂性,难于通过传统的实验方法来找出混沌的规律,因此一时显得束手无策。人们已经知道,对于非线性方程,我们只要使用\[0,1\]区间的数值迭代,就可以产生混沌现象,但混沌就是"乱七八糟"的杂乱无章吗?它的产生和运行是否也有一定的规律?在混乱之中是否也能找到某种规律性的东西?是否在乱七八糟之中能够找到某种不变性?这些问题都没有办法用传统的研究方法来回答。菲根鲍姆则另辟蹊径,玩起了数字游戏,并在继洛仑兹、李天岩和约克之后成为又做出惊人发现的人。

20 世纪 70 年代初,自从梅发现了简单的非线性方程具有异常复杂的特性之后,兴起了一股研究热潮。因为 $x_{n+1}=\lambda x_n(1-x_n)$ 计算简单,也由于没有现成的理论工具,菲根鲍姆只好使用"最笨"的函数的数值迭代做起。几年的时间里,他手不离微型计算机和可编简单程序的小型计算器,一次次地进行迭代计算,这样那样地拼凑组合,看看又什么样的规律可循。他相信,

确定的方程不仅能够产生古怪的结果,而且一定存在着一些人们可以探索并且必须认真对待的重要规律。他每计算一次就记录一次计算结果,并找出出现分叉时的各个 λ 值。在一次次的记录中,菲根鲍姆发现,在周期倍增分叉过程中,随着分叉次数 m 的增加,相邻两个分叉点 λ_m 和 λ_{m+1} 的间距 $\Delta_m = \lambda_{m+1} - \lambda_m$ 组成一个渐近的等比数列,分叉宽度 ξ_m 也组成一个渐近的等比数列。菲根鲍姆用计算机做迭代实验证实,当 m 分叉间距之比 $\Delta_m/\Delta_{m+1} = \delta = 4.669\ 201\ 609\cdots\cdots$ 分叉宽度之比 $\xi_m/\xi_{m+1} = \alpha = 2.502\ 907\ 875\cdots\cdots$ 他通过 6 年的函数迭代等数值计算,终于发现了混沌的倍周期分岔现象,找到了通向混沌的普遍道路,并发现了混沌发生的这两个普适常数,现在被称为菲根鲍姆常数,即 $\delta = 4.669\ 201\ 609\cdots\cdots$ 和 $\alpha = 2.502\ 907\ 875\cdots\cdots$。这两个常数是自然界的普适常数,被认为是20 世纪最伟大的发现之一,反映了混沌分岔的速度比例,并且适用于所有混沌系统。这两个常数的发现,使人类对简单方程的确定性系统是怎样走向混沌的有了深刻的认识(格莱克,1990:183)。从规矩到混沌,并不是说乱就乱,而是按照一定的规律走向混沌。

当菲根鲍姆开始思考非线性时,他意识到传统的处理方法都无能为力,于是他完全依赖最原始的纸和笔,做起了简单的运算,所处理的对象是中学生都认为特别简单的方程:$x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n)$。当然,他的关注并非只做一次简单计算,而是把它作为反馈回路无限重复下去。每一次计算的输出都反馈回去,作为下一次计算的输入。从本质上来说,这与标准物理学的复杂计算风马牛不相及,因为它不是一次能够解决的错综复杂的算式,而是一次再次地重复简单的计算。数值实验者将盯着看下去,就像化学家凝视着烧杯中冒泡的反应一样。这里的输出只是一串数字,而且它并不总是收敛到恒定的终值。它可能终于在两个值之间来回振荡,或者可以持续混沌地变化下去,无论观察多久都是如此。这些不同的可能行为之间的选择依赖于调整参数的值。

菲根鲍姆一方面进行这项不大富有实验性的数值工作,同时尝试用更传统的理论方法分析非线性函数。对菲根鲍姆来说,可编程计算器 HP-65 是“铅笔和纸张”,是与另一种尚未孕育成的使用计算机的风格之间的桥梁。菲根鲍姆借助计算器把代数分析和数值探索一起用来拼凑出关于平方映射的知识,同时集中注意于有序和混沌之间的边界区。在隐喻的意义上,他知道这个区域与流体中层流和湍流之间的神秘边界相像。在走向该区域的混沌的道路上有一串倍周期转变,从 2 周期分裂成 4 周期,4 周期分裂为 8 周期,等等。这些分裂具有迷人的式样。菲根鲍姆决定首先精确算出产生这些分裂的参数值。由于计算器太慢,每一次周期倍增的精确参数值要用好

几分钟才能算出来,越往前算,时间越长。如果用快速计算机和打印机,菲根鲍姆可能什么模式也看不出来。但是他必须用手把数据记录下来,然后在等待结果出来时还必须思索,为了节省时间,他必须猜测下一个答案将在哪里。忽然他发现根本不必作猜测,这一系统中隐藏着一种出乎意料的规律性:这些数字是几何收敛的,就像在透视画中一排等同的电线杆收敛向地平线一样。如果知道两个相邻电线杆的大小,其余的也就都知道了;第二个与第一个之比也就是第三个与第二个之比,如此等等。倍周期的来临不只是越来越快,而是按照恒定速率越来越快。

菲根鲍姆以自己计算器的最高精度——3 位小数——计算收敛比率,得到了一个数 4.669。他尝试用这个数去凑合所有的标准常数——π,e,等等,证明了这的确是一个新常数。他用三角函数和其他各种非线性函数验证,证明它适用于一切所想到的经过一系列分叉而走向无序的函数。每个函数都产生同一个数。然后他又用计算机算出更精确的数值,他确信找到了一条计算复杂非线性问题的新途径。

菲根鲍姆在探索数学和物理之间一片被遗忘的土地。他的工作难于归类。这不是数学,因为他什么也没有证明。“他的确在研究数字,可是数字对于数学家来说,就好像几袋硬币对于投资银行家一样——名义上是他职业中的要素,实际上过于琐碎和特殊,因而不值得在这上面浪费时间。数学家们的真正货币是思想。菲根鲍姆是在实现一个物理课题计划,而看来奇怪的是,它几乎是一种实验物理。”(格莱克,1990:190)

作为粒子物理学的博士,却不喜欢进实验室做传统的物理实验,不再研究介子和夸克,而是把数字和函数作为研究对象。他从小就喜欢与数字打交道,对数值有着特别的兴趣和敏感。这两个常数的发现,就是他捣鼓数字的结果。在发现的过程中,计算机就是他的“加速器”和“云雾室”,并把它当作乐器一样抚弄(格莱克,1990:176)。菲根鲍姆和后继的混沌研究者们在计算机的世界里创造他自己的“微型宇宙”,观察它们的演化。然后他们可以改变这种或那种性质,观察由此得到的变化的历程。

总之,面对混沌的复杂性,其他方法都似乎显得无可奈何;混沌现象的许多规律的发现都应该归功于数值方法。数值方法是复杂性科学特别是混沌理论研究的重要方法之一。

四、数值方法与分形理论

分形理论是美国数学家曼德布罗特(Mandelbrot)创立的一门新几何学,它可以描述、计算和思考那些不规则、破碎、参差不齐和断裂的几何形状,包

括从雪花的结晶曲线到星系中互不联系的尘埃。分形曲线意味着深藏在这些惊人复杂的形状中的有组织的结构。如今,分形已经成为理解非线性动力学的关键结构,分形理论也已经成为自组织和复杂性理论的重要理论构成。

那么,怎么会想到创立这样一门与传统几何学不同的新几何学呢?这也要从数值处理和数值方法说起,可以说曼德布罗特对分形的发现和刻画也应归功于数值方法。原来,曼德布罗特在 IBM 公司工作的时候曾经涉猎经济学,研究一种经济模式中高低收入的分布。期间他收集到了美国农业部记录下的 1900 年以来的关于棉花价格的大量数据,并把它作成图表。当曼德布罗特把棉价数据输入 IBM 公司的计算机之后,他发现了所寻求的惊人结果。从正态分布角度产生偏差的数字,从尺度变换的角度却给出了对称。价格的每一次特定的变化是随机和不能预言的。但成串的变化又是与尺度无关的;价格的日变化和月变化曲线完全一致。在大量无序的数据中竟然存在着一种出乎意料的有序。曼德布罗特自问:考虑到所考察的数字的任意性,还会有任何规律存在吗?为什么它对于个人收入和棉价同样适用呢?从这些数据处理中,他发现了不同尺度下变化中的不变性,这正是分形的重要观念(格莱克,1990:87-91)。

在阅读他人所写海岸线的问题的文章时,曼德布罗特发现,我们平时认为确定无疑的海岸线长度其实并不确定,同一条海岸线各国的数据都不一样。比如说,英国的海岸线究竟有多长?过去认为这是一个很简单的问题,但是我们用不同的尺度去测量,海岸线的长度是不一样的,用越小的尺度测量出来的海岸线就越长。这是一个不确定的问题。但是,无论使用什么样的尺度,无论把海岸线图像放大多少倍,海岸线都是曲曲弯弯的,都是粗糙和无规则的,这是变化中的不变性。这样,曼德布罗特认识到,传统的几何学只能处理光滑、规则的图形,但"云彩不呈球形,山峰不呈锥体,海岸线不是圆圈,树干不是光溜溜,闪电永远不会沿直线行进"(转引自:陆同兴,2002:196)。为了反映这些更为广泛的不规则形状,曼德布罗特创立了分形几何,以处理这些更加普遍且复杂的图形。由此可以看出,分形几何的创立与数值计算方法有重要的关系。

在欧几里得几何中,一个重要的工作是几何证明,证明图形之间的相似或相同,但分形几何的一个重要工作是计算图形的分形维数,因为每个不规则的图形的维数都不一定相同,而且都呈分数状态。算出几何图形的分维数就更能把握图形的复杂程度。

曼德布罗特不但通过数值分析计算发现了分形几何,并计算其分维数,

而且他还通过数值迭代方法,对康托尔集合、科赫曲线等原来认为是病态的东西进行重新构造,从而发现分形现象的普遍性,并通过迭代方法重新构造了许许多多有趣的分形图形。这里我们只分析几个简单的分形图形,看它们是怎样迭代构造的。

先说康托尔三分集。取一线段[0,1],称为初始元,将其三等分,即各线段的长度为原线段的1/3。取走中间一段,保留两侧的两段。将留下的两段分别再三等分,并取走它们中间一段,保留两侧的其余两段。照此继续地分割取走下去,留下的线段越来越多,而其长度则越来越短,最终就分割成长度为无限短的无穷多个点,这些保留下来的分布开来的点组成所谓的康托尔三分集(图4.3)。随着线段分为无穷多段,不仅每段的长度为零,其总长度也为零。这种三分点集,比原来的一维线段的维数少,而比零维的点的维数又多,经计算,它的维数为0.630 9……这就是为什么传统几何学把它当作怪物的原因,实际上,它就是一个最早构造出来的最简单的分形。它已经是非线性复杂性的图形了。

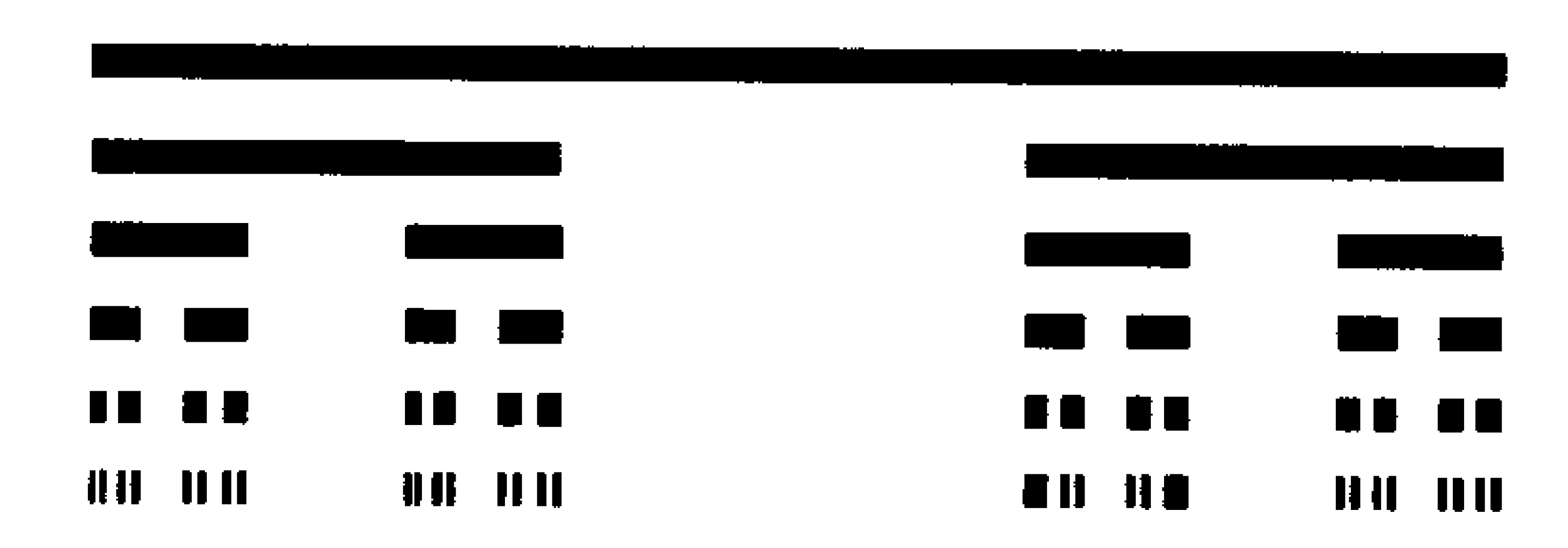


图4.3 康托尔集合

资料来源:陆同兴,2002:202

科赫曲线是一种具有相似结构的弯弯曲曲的线段。它的构造过程如下:取一条长度为 L_0 的直线段,像构造康托尔三分集那样,先将它三等分,然后保留两侧的两段,将中间的一段改为改成夹角为60°的两个等长的直线,每段的长度均为 $L_0/3$,这是 $n=1$ 的第一次操作。类似地,第二次操作是将上次所得的四段边长为 $L_0/3$ 的线段都进行三等分,现在每段的长度为 $L_0/9$,并将它们中间的一段改为夹角60°的两个长度为 $L_0/3$ 的直线。如果将上述操作一直进行下去,最终得到一条具有自相似结构的曲线,称为三次科赫曲线。图4.4所示是分别构造一次、二次和三次以后的图形。这条曲线具有无限的长度,但只占有有限的面积。用这种方法,还可以构造出科赫雪花图形(图4.5)(曼德布罗特,1998:54-55)。一条有限长度的直线,经上述方法的反复操作,变成了长度无限、面积有限的曲线,这在传统几何学看来也是一个怪物。在分形理论中,许许多多的复杂的分形图都是由一些简单的算法通过计算机的反复迭代而产生的。那些用计算机做实验的分形几何学家更

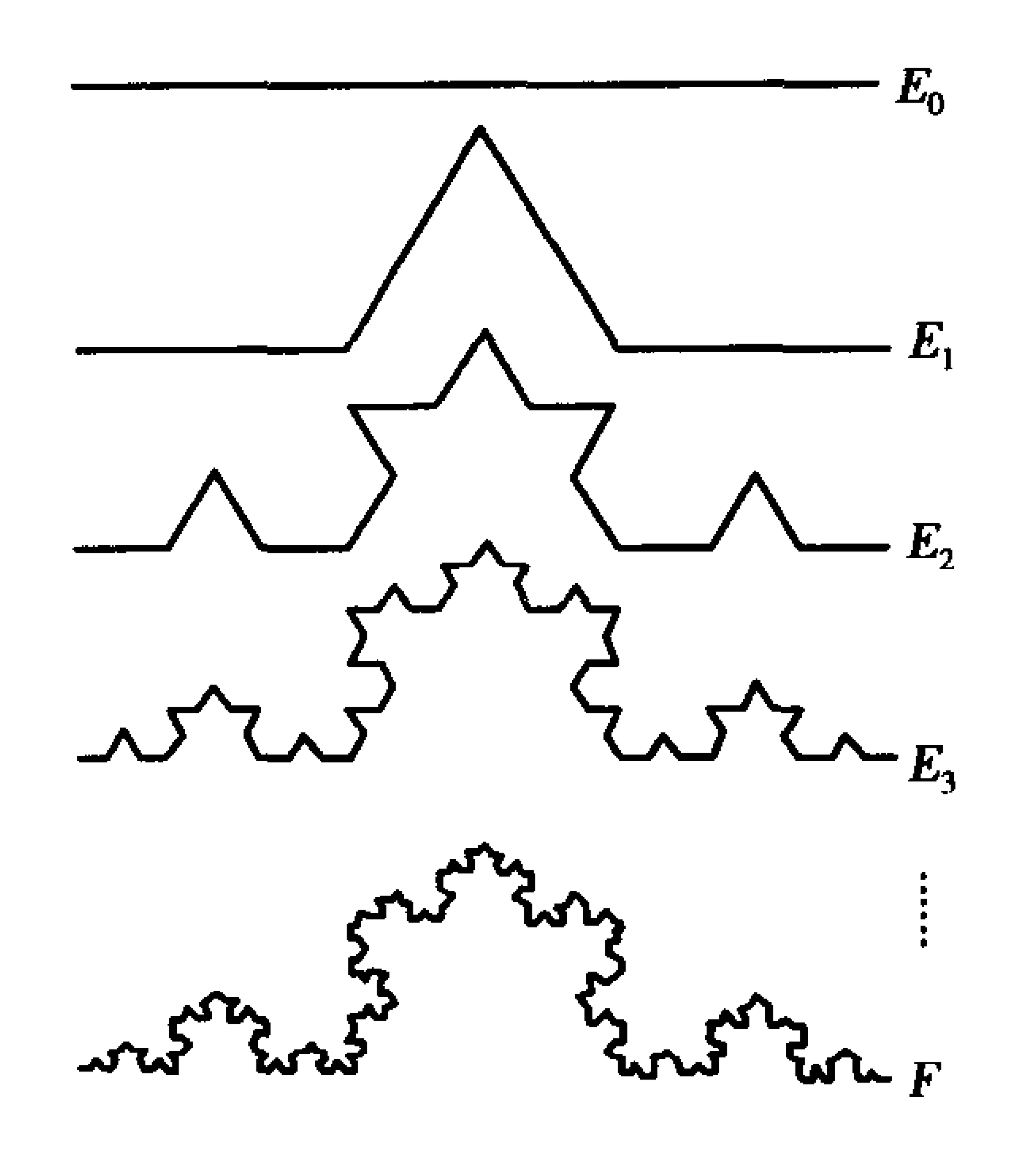


图4.4　科赫曲线构造过程

图4.5　科赫雪花

像实验室的科学家，它们依赖规则行事而不经过通常的定理证明就能有所发现。要是离开了计算机的数值计算，这些工作都是不可想像的。

五、数值方法的一般方法论意义

数值方法在复杂性科学中起到了重要的作用。洛仑兹奇怪吸引子的发现，李天岩和约克的混沌现象的认识，菲根鲍姆对混沌规律的研究，曼德布罗特复杂的分维图形制作，没有计算机的数值计算是不可想像的。无穷嵌套的自相似结构，三体问题中的混沌轨迹，无不称之为计算机数值计算的杰作。可以预计，在复杂性科学今后的发展中，数值方法将会日益重要。

这种数值方法是否具有一般的方法论意义呢？我们说过，数字和数值计算是人类最早的科学认识之一，数值是人类与之打交道最多的活动之一。因此，数值方法肯定具有一般方法论意义。在数学中，由于计算机的应用，已经形成了一门比较成熟的学科，就叫做数值方法。它借助于计算机，对各种复杂的对象，变换成使用数值进行计算分析的一门数学分支。数学中的数值方法已经在力学、化学、自动控制、机械制造等科学和技术当中有了广泛的使用。只不过它是一门数学理论，还没有上升到科学方法论的层次。

在物理学、化学等自然科学中以及机械工程、控制工程等工程技术中，处理的一般都是线性问题，也就是说，对线性区的问题传统的科学技术已经处理得很娴熟，已有的研究问题也得到了较好的解决。换句话说，各门科学技术在线性区里已经基本上变为贫矿区，而现在的富矿区基本上都处于非

线性区域。对于绝大多数的变系数,非线性、不规则等复杂问题的解决,传统的分析、还原方法几乎无能为力。例如,非线性微分方程的求解和研究由它所描述的复杂现象及过程的时间演化与动态行为,用求解解析解的方法是难于奏效的,只能依靠计算机辅助下的数值实验方法,它能对理论分析上难以处理的复杂问题给出丰富的系统性的,感性而直观的启示。现在各门学科所剩下的问题都是一些难于用传统方法解决的非线性等引起的复杂性问题,这就是为什么现在各门学科都涉及复杂性科学;复杂性思想渗透到几乎所有学科,现在已经形成了一场声势浩大的复杂性运动,因此,作为复杂性科学重要方法的数值方法肯定会在今后的各门科学技术研究中发挥重要的作用。

我们以生物学为例来看看数值方法在其他科学技术中的应用吧。生物学的研究有两条径路,一是以分析还原为主的分子生物学径路,一是以整体综合的生态学径路。20 世纪 70 年代,已经成名的物理学家罗伯特·梅转向生物学特别是生态学研究。生态学的一个基本问题是从量的方面探讨系统中各物种的自然规模,以保持生态系统的平衡。以前的生态学研究主要还是定性的研究,梅也是从生态学的基本生殖方程 $x_{n+1}=rx_n(1-x_n)$ 进行迭代处理,研究物种的规模变化规律。他发现,即使没有外界噪声的影响,生态系统也会产生振荡,运行情况也可能十分古怪,也会出现“简单的方程,古怪的行为”的现象。他正是从研究生态系统基本方程的数值迭代入手去研究生态学,并成为举世著名的生物学家的。也就是说,梅正是使用数值方法来研究生态学问题,并对其中的许多问题作出重要贡献的。

总之,数值方法开创了复杂性科学研究的新途径,是复杂性科学重要的研究方法,同时也具有一般方法论的意义,也将成为其他各门科学技术研究的一般方法。

第四节　复杂性科学与计算方法

计算是科学研究的基本操作,也是科学发现的重要途径。然而,在复杂性科学中,计算却有着特别的意义。计算复杂性和算法复杂性基本上就是依靠计算方法来进行研究的,所以,复杂性科学与计算方法有着密切的

联系。

一、计算·算法与计算方法

计算几乎无人不晓，但是理解其意义却存在歧义和困难。正如爱因斯坦所说，一个概念越是普遍，越是频繁地进入人们的视野，我们要想理解它们的意义就越困难。因此，虽然人类很早就学会了加减乘除等运算，但直到20世纪30年代，还没有什么人能真正说清楚计算的本质是什么。从20世纪30年代开始，许多数学家都开始对自然数论域里的数论函数的可计算研究，提出了几种可计算函数定义。例如，丘奇（Church，A.）于1935年提出了λ—转换演算，哥德尔（Godel，K.）、克林尼（Kleene，S. C.）于1936年定义了递归函数，图灵（Turing，A.）1936年提出了抽象计算机模型，马普科布（Map-kob，A. A.）1951年定义了正规算法（吴彤，2004）。

那么，什么是计算呢？简单地说，所谓计算就是一组符号串的变换，从一个已知符号开始，按照一定规则经过有限步骤，最后得到一个满足预先规定的符号串，这种变换过程就是计算。比如，从1+1变换成2，就是一个加法计算；从x^3变换为$3x^2$就是微分计算。按照这个定义，定理证明、文字翻译等都是计算，因为它们都是一种符号串的变换过程。

与计算密切相关的另一个概念是算法。什么是算法？算法即解题过程的精确描述，求解某类问题的通用规则或方法，即符号串变换的规则。对算法的一个非形式的描述为：一组（有限个）规则，它为解某个特定问题提供了一个运算序列。直观地说，求解某一个或一类问题的算法就是一组规则。人们常常把算法看成是用某种精确的语言写成的程序。算法或程序的执行和操作就是计算。从算法的角度讲，一个问题是不是可计算的，与该问题是不是具有相应的算法是完全一致的。

在计算机科学里，算法是计算机解题方法的精确描述或者是计算机解题的程序。算法的特征如下：①有穷性，一个算法在执行有穷个计算步骤后必须终止；②确定性，算法的每一步都必须是精确定义的，无二义性的；③输入，算法总是施加到运算对象上的，输入描述运算对象的初始状态。输入是算法的起点，一个算法有零或多个输入，“零”这里指在算法本身中设定的初始条件。④输出，一个算法一般有一个或多个输出，它们通常可以被解释为“对输入的计算结果”，没有输出的算法是无意义的；⑤可行性，算法中有待执行的运算都是相当基本的，每种运算至少在原则上可以付诸实施，并且能够在有限时间内完成（吴彤，2004）。

数学家的对计算问题进行了研究并表明，有些数学问题是不可计算的。

所谓"不可计算"就是指无法找到可行的算法。传统观点认为数学问题可以被简单地划分为,可解即有算法的与不可解的即无算法的两类。计算实践却发现由于受计算时间、存储空间的限制,即使某一类问题在理论上是可解的,在现实中由于耗费时间与空间巨大而成为实际的不可解问题。例如,一个长 1 000 的输入字要计算 2^{1000} 步,这在今天的大型计算机甚至可以想像的将来的计算机都是办不到的。因此,自 20 世纪 60 年代起,对时空受限的图灵机理论发展起来了,形成了今天的计算复杂性理论和算法复杂性理论等复杂性的分支学科,以便对复杂性中的计算问题进行专门的研究。

所谓计算方法就是从可计算理论出发,对问题的是否可以计算,以及怎样计算进行分析,并且对计算的方法进行算法描述,以找到问题的解决方案或途径。如今,复杂性理论的许多分支都与计算或算法问题有关,实际上都是把问题归结为计算问题,或者是算法的描述问题。计算复杂性当然是专门研究复杂性的计算问题,而算法复杂性则专门研究复杂性的算法描述问题,实质上也就是计算问题。而现在在圣菲研究所特别红火的几个研究方向,例如,人工生命问题、复杂适应系统理论问题、涌现生成问题等,无不是探讨其中的计算问题。因此,在复杂性科学中,算法描述、计算方法扮演着十分重要的方法论角色,计算方法是复杂性科学的重要方法,是复杂性科学方法论体系的重要组成部分,并在各个分支研究中有着广泛的应用。我们有必要将计算方法专门进行方法论的研究,并把它上升为一种一般性的方法论手段,探讨它的一般方法论意义。

二、计算方法与计算复杂性

计算复杂性的研究方法基本上以计算方法为基础。计算复杂性(computational complexity)的含义是指解决一个问题所耗费的计算资源的数量,其中计算资源主要包括空间和时间。一般地说,时间上的计算复杂性即一个计算机描述一个系统(或解一个问题)所需要的时间;空间上的计算复杂性即描述一个系统所需要的计算机存储量。计算复杂性的基本信念是:我们可以把解决问题的时间、空间耗费的代价来作为该问题的复杂性的测度,并据此判断该问题是否属于难解的复杂性问题,在认识论意义上可视为主体"有效解决对象的认识难度所付出的代价"(吴彤,2002)。随着计算机存储技术的发展,计算需要与存储空间的矛盾变得不是很突出了,计算时间的耗费成为衡量计算复杂性的重要内容。对计算时间耗费的研究发现,影响计算速度的一个关键因素是时间函数的次数,多项式时间耗时最少,指数增长的时间函数,其计算时间复杂性随时间增长最快。

计算复杂性理论把数学问题分为可解、难解和不可解三类，因此，也可以说，计算复杂性就是指在解决问题时随问题规模 N 增长所需要的代价增长。如果计算时间（或空间）的增长不超过 N 的某个幂次或多项式，那么该问题是简单的，称为 P 类问题（P 即 Polynomial 的缩写）；如果增长速率超过 N 的任何多项式，则问题是困难的，称为 NP 类（NP 即 Non-deterministic Polynomial 的缩写）问题，即复杂性问题之一。

P 类问题（class P of problems）即多项式时间内可以解决的问题类，它是计算复杂性理论中十分重要的问题类。其数学定义：一个语言 L 称为属于语言复杂性类 P，如果存在一个确定型图灵机 M 和一个多项式 p，M 在 p(n) 时间内接受 L，亦即对于每个长度为 n 的字符串 w，只要 w 在 L 内，M 就能在 p(n) 步内停机并接受 w。其直觉意义是：有一个算法和一个多项式 p，若字串编码长度为 n，则该算法可以在 p(n) 步内给出问题的解答。P 类问题公认是计算机上现实可解决的问题（堵丁柱等，2002：20）。

NP（non-polynomial）类问题（class NP of problems），直观地说，即不能在确定型图灵机上用多项式算法加以求解的问题，但它是可以用一种非确定性多项式算法求解的问题。许多组合、排队和路线优化问题都属于 NP 类问题。例如著名的推销商路线选择问题就是 NP 问题。这个问题是假设某位推销商要到 n 个城市，已知各城市之间路程 d 和一个界限 B，问是否存在一条旅行路线，该路线恰好到每个城市一次，最后返回出发城市，且总路程不超过 B（判定形式问题）。或问总路程中最短路线（最优形式问题）。以上问题的复杂性就是以被计算的总代价来识别的。众所周知，要找到推销商问题的精确解，其代价是解的问题按照被访问城市数目指数增长——问题将变得非常复杂。如果存在 60 个城市，检查每一种旅行路线的总花费时间将要用 366 个世纪！有些问题，如著名的歌德巴赫猜想、费马猜想等，通常是数学家直觉上判断认为可以成立，但又无法通过严格的数学论证得到证明，即一个问题根本没有算法，这就是无解问题。

计算复杂性也就是计算的"有效性"（effectiveness）问题。这种有效性包括两个层面的衡量，一是理论层面，即考察问题是否具有算法；二是实践层面，即考察具有算法的问题是否能在有限的时间与空间内有效地得到解决。这实际上也就是计算复杂性理论对复杂度区分的标准，即最复杂的问题是不可解的无算法的问题，其次是有算法但难解的 NPC 问题，最简单的就是可解的多项式 P 类问题。计算复杂性中的复杂性只是一种在特定问题求解领域内的操作复杂性（operational complexity），以是否能在有限的时空条件下有效操作作为其判定复杂度的标准。凡是无法操作的都归为不可解的，也

就是最复杂的问题；凡是可以操作但却无法在当下时空内完成的，归为难解问题；凡是可以操作并能在有限时空内完成的称为可解问题，也就是简单问题。所以，计算复杂性是把系统的复杂性转化为解决一个问题所需耗费的时间或空间特别是时间的问题。

由此，我们可以看出，计算复杂性所研究的问题都是有关计算问题，而其基本研究方法也就是计算方法。

三、计算方法与算法复杂性

描述复杂性（description complexity）也称为算法复杂性（algorithmic complexity），也是用数学方法研究各类问题复杂性的学科，主要是由 A. N. Kolmogorov、G. J. Chaitin 和 R. J. Solomonoff 在 20 世纪 60 年代中期分别独立提出的概念，又称为 Kolmogorov 复杂性。描述复杂性起源于概率论、信息论以及关于随机性的哲学思考，并随着算法理论的发展而走向成熟。

经典信息学认为，信息是有意义的符号序列，所谓"有意义"是指该符号序列是能消除不确定性的消息集合。维纳从这一角度给出了信息量的计算公式，但信息学并不怎么关心这些符号序列的转换问题。描述复杂性理论认为，传递信息并不需要传递符号串本身的长度，一个符号集合包含的信息量就是对它最精练描述的长度，我们可用转换后的"描述"代替符号串本身，并以描述长度的比较来说明对象集的复杂性。描述复杂性的基本信念是：在一给定粗粒度下，存在一种通用的描述方法使得一个数据集的最短长度描述能体现出这个数据集的本质规律，比较不同对象数据集的"最短长度描述"，我们就可以公正地判断出对象的复杂性程度的高低。

描述复杂性定义如下（吴彤，2004）：对每一个 D 域中的对象 x，我们称最小程序 p 的长度 $|p|$ 就是运用指定方法 S 产生的关于对象 x 的复杂性。对计算机 S 而言，设给定的符号串为 x，将产生 x 的程序记为 p。对一个计算机来说，p 是输入，x 是输出。粗略地说，关于一个符号串 x 的柯尔莫哥洛夫复杂性，就是产生 x 的最短程序 p 的长度。上述定义可写为

$$\mathrm{Ks}(x) = \min\{|p|:S(p) = n(x)\},$$
$$\mathrm{Ks}(x) = \infty\text{，如果不存在 } p.$$

其中 $\mathrm{Ks}(x)$ 即柯尔莫哥洛夫复杂性。后一个公式的含义明显，即如果传送的符号串完全杂乱无章，找不到任何规律（即程序 p），那么，复杂性就等于符号串本身，而符号串是无规则的无穷数，复杂性即无穷。在算法复杂性中，越随机性（random）的东西越复杂。柯尔莫哥洛夫复杂性的概念是建立

在递归的、可枚举的和可计算基础上，所以算法复杂性仅仅是对一类复杂对象的描述，其本质是如何找到一种对符号串最短的描述，从而找到一种最好的算法。

如果选定一种语言，对某图形、模式或物体进行描述，那么其描述长度就可用来测度这些图形、模式或物体的复杂性。不过，描述长度的大小依赖于描述语言、背景知识和粗粒化程度，具有一定的主观性。例如一个描述"正方形的面积等于它的边长的平方值"，对于不知道正方形为何物的人来说是不可理解的。因此，这不是一个合适的描述，必须把这个描述扩充为"四边相等且顶角都是直角的四边形的面积等于它的边长的平方值"，很明显，描述的长度变长了。描述复杂性起源于通常意义上的描述概念，但描述复杂性并不等同于后者。Nicholas Rescher 把通常意义上的描述复杂性称为"描述的复杂性"（descriptive complexity），指充分描述讨论系统所必须的说明的长度。对同一对象，描述越详尽该描述（不是该对象）就越复杂（Rescher，1998：9-10）。盖尔曼（2001：34）则把这称为"原始复杂性"，更精确地定义为"用双方事先共享（且彼此都知道共享这一事实）的语言、知识及理解，将一个已知粗粒化程度的系统描述给远处某人时，所用最短消息的长度。"

描述复杂性的实质是对人们语义层面的复杂性转换为语法层面的复杂性所付出代价的刻画。它与计算复杂性一样，也是基于算法的复杂性，只不过它不是以所耗费的时间为代价，而是以能生成符号集最短程序的长度作为衡量基准，这一长度（用比特表示）的大小就是算法信息量 AIC（algorithmic information content），并且 AIC 越大，描述的复杂度也就越大。理论上，AIC 与字符串的可压缩性成反比。我们可用可压缩性作为字符串的选择标准，规则字符串是极度可压缩的；一些字符串虽然可以压缩，却需要付出很大的代价；很多字符串是根本不可压缩的，随机字符串具有最大的算法信息量 AIC，不可压缩，我们找不到可以描述它们的规则（算法），它们的绝对信息内容就是它们本身。例如，序列 111111……是均匀的（不复杂的）。对应的程序如下；在每一个 1 后续写 1。这个短程序使得这个序列得以延续，不管要多长都可以办到。序列 110110110110……的复杂性高一些，但仍然很容易写出程序：在两个 1 后续写 0 并重复。甚至序列 110110100110110100……也可以用很短的程序来描述；在两个 1 后续写 0 并重复；每三次重复将第二个 1 代之以 0。这样的序列具有可定义的结构，有对应的程序来传达信息。比较这三个一个比一个复杂些的序列，再看下面的序列 110100101101110100 10……，它不再是一个可识别的结构，若想编程必须将

它全部列出。AIC 这一特性就透露出描述复杂性(算法复杂性)的本质,即描述复杂性很大程度是对字符串随机性的衡量,随机性越大,复杂性就越大。

不管是用哪一种描述方法来描述系统的复杂性,算法复杂性或描述复杂性问题都涉及算法描述,这是典型的计算问题,其使用的研究方法当然也是计算方法,因此计算方法是研究算法复杂性的重要方法。

四、计算方法与复杂适应系统

冯·诺依曼早就说过,生物的进化可以通过计算的方法进行研究。然而他的这一思想被忽视了多年,一直等到 20 世纪 60 ~ 70 年代,约翰·霍兰提出和完善了遗传算法理论,并在 80 年代有了实际的应用(建立最优化模型)之后,进化计算才得到了广泛的关注。

20 世纪 60 年代,霍兰开始研究自然和人工系统中的适应行为。在控制理论和经典的人工智能领域,人们也谈论适应性,但是,他们的目标仅仅是考虑怎样在系统和环境及其变化规律不确定时,通过自动调整系统预先设定好的结构参数来减少不确定性,达到改善系统的品质的目的。但是霍兰认为,这种理论对于生物的进化适应性问题没有任何帮助。因为进化论的整个概念中没有任何经验可循,也没有任何向导。一代代的物种是突变和两性基因的随机重组,即通过试错法探索进化的可能方向的。因此,霍兰关注的首要问题是,进化的新性质是如何涌现出来的,而不是有意保持某种已有的确定信息。

为了回答这个问题,霍兰提出了一个关于适应系统的建设模块(building block)的概念,认为进化的适应机制就是在一个环境中通过试错,重新组合系统的建设模块的过程。基于这样的认识,霍兰用 0/1 表示符号作为建设模块,通过引入交换、变异和选择作为算法,用计算机模拟的方法得到了表达进化、适应性和涌现机制的遗传算法。

遗传算法是在个体基因型表示的基础上,通过诸如交叉、突变等操作进行的一种搜索算法。遗传算法应用于实际问题时,首先对问题进行编码,这种编码被称为个体,个体的集合被称为群体,每一个个体都表示问题的一个潜在解。然后从随机产生的一群初始解开始,使它们发生交叉、突变、复制和选择等操作。其中,交叉是使不同个体对象交换部分遗传信息的一种操作,突变是将个体对象的某些基因变为其他等位基因的操作(一般是概率方式的),复制是群体从一代向下一代传递的一种操作,选择是淘汰对环境适应能力较差的个体的一种操作。伴随着算法的运行,优良的个体被逐渐保

留并加以组合，从而不断产生新个体。由于每一代都有基因的重新组合，因此群体中就会经常产生新颖的建设模块，这样遗传算法就会很快产生具有双倍或三倍优势的建设模块。如果这些建设模块的组合又产生出更大的优势，那么具有这些优秀建设模块的个体就会比以往更快地普及于整个群体。结果遗传算法很快指向现有问题的答案，即使事先并不知道从哪儿寻找答案。60 年代中期，霍兰证明了遗传算法的基本定理，他称之为图解定理：在繁衍、交叉和突变之中，几乎所有具有超常强健性的紧密基因群能够在物种中呈指数比例地发展（沃德罗普，1997：239）。

遗传算法和图解定理紧紧抓住了进化的本质问题，但由于他把“生物体”当作由程序员设计出来的单纯的 DNA，并没有包括适应性的活动主体（agent），因此过于简单，还不能说明心智的适应性。但他仍然相信心智的适应性和自然的适应性可以从相同的理论中推导出来。为了阐明心智的适应性和涌现，霍兰为每个活动主体引入了内部模型（internal model）的概念，认为所有复杂的适应系统，包括细菌在内，都能建立让自己预测世界的模型（霍兰，2000：31）。这个模型并不是由某个外在的什么东西操纵的，而是通过来自环境的反馈得来的。即是说，一个活动主体能够不断地测试自己的模型，看看自己的模型对真实世界的预测有多准确来改善自己的内部模型。如果它能够在实践中存活下来，它就调整自己的这些模型，以使自己下次做得更好。在生物学上，活动主体是生物个体，反馈由自然选择提供，内部模型的不断改进就是进化。在认知科学上，活动主体是心智，反馈来自于老师或直接的经验，改善就是学习。

为了更进一步说明学习的过程，霍兰引入了“分类器”的概念，同时根据赫布（Hebb）的神经网络理论，认为学习是赫布式的：即每当一个活动主体做对了什么事，就从环境中得到了一个正反馈，它就强化那些与此相关的分类器。活动主体之间通过拍卖竞争机制相互作用，通过所谓的“桶队算法”（bucket brigade algorithm）对每个活动主体的行为给予反馈，从而产生学习行为并适应环境（霍兰，2000：55）。在此基础上，他又一次运用了 0/1 串表示方法和遗传算法来扩充整个系统的学习能力，使得系统不仅具有开采式的学习，而且还具有探险式的学习。

霍兰在研究复杂系统的涌现规律时，所使用的方法也是算法描述，不过霍兰把它称为“机制”。他用算法描述对产生涌现现象的元素、规则和相互作用进行了精确的描述，并把它称为受限生成过程。霍兰对涌现生成现象的机制描述就方法来说，其实就是一种典型的计算方法。他对涌现的初步研究为计算方法在复杂性研究中的应用提供了一个成功的案例。具体说

来,对受限生成过程可以通过下面的四个步骤完成其机制的描述(霍兰,2001:139-140)。

(1)将规则的概念转换成机制的概念(如西洋跳棋中“跳”的规则或赫布定律)。正如规则之于游戏,规律之于物质系统一样,机制将被用来定义系统中的元素。简单地说,机制根据行为(或信息)作出反应,对输入进行处理并产生最终的输出行为(或信息)。在一般用法中,“机制”这个词会有多种含义。但是,我将用定义和符号来对这个词加以限定,以使它有一个统一明确的意思。

(2)将定义用多种机制连接起来形成网络的方法。这些网络就是所说的受限生成过程。很多模型都涉及到不止一种机制(如物理学中不同的基本粒子),为了运用这种方法进行说明,必须明确机制的行为是如何影响其他机制的。在这个框架中,正是机制间的相互作用产生了复杂的有组织的行为。首先,霍兰将讨论具有各种约束条件的受限生成过程,这些约束条件是从棋类游戏的固定布局或者物理系统中的几何图形得到的启示。其次,他将着眼于一种概括性描述,以便明确为什么受限生成过程中的相互联系能够在一定条件下生成或被取消,从而改变已有的几何图形。

(3)这些机制——一旦连接起来,就会遇到类似于对策树的情况——由一些带约束条件的相互作用着的机制产生的所有可能性的集合。状态树是模仿行为可能过程的一种便利方法,如游戏策略和动力学。为了实现这个目的,霍兰定义了总的受限生成过程的状态,这个状态将由组成这个受限生成过程的状态决定。霍兰把对西洋跳棋程序和神经网络进行过的研究工作,即将所有涉及将来可能性的与受限生成过程有关的一切事物,提炼成被称为全局状态的一个单一实体。然后,他继续描述从一种状态转换到另一种状态的合法方式。这样,霍兰用转换函数来精确描述了状态变化的可能性。

(4)霍兰还想提供受限生成过程中一个特别的过程,来定义子集合中的层次,这就是使用基本机制建立起更复杂的机制的过程。这将更便于对系统加以解释,并且使由此形成的结构与大多数表现出涌现现象的系统固有的层次性相一致。

总之,霍兰关于遗传算法、适应性学习和复杂适应系统的概念都是建立在计算、算法方法的基础上,都是运用计算方法的典型案例。

五、计算方法与人工生命研究

人工生命诞生于美国圣菲研究所,但它的智慧种子可以追溯到图灵

(A. Turing)和冯·诺伊曼。图灵证明生命的胚胎发育可以用计算的方法加以研究。冯·诺伊曼则试图用计算机的方法描述生物自我繁殖的逻辑形式。到了20世纪七八十年代,随着计算机速度的大幅度提高以及个人计算机的普及,在康韦、沃弗拉姆等人有关"生命游戏"研究的基础上,兰顿发现,处于"混沌边缘"的元胞自动机既有足够的稳定性存储信息,又有足够的流动性来传递信息。当他把这种规律与生命和智能联系起来,他认识到生命或者智能很可能起源于"混沌边缘"。于是,一个崭新的思想浮现在兰顿的脑海中:如果我们在计算机或其他媒介中建立起产生"混沌边缘"的一定规则,那么,从这些规则中就可能浮现出生命来。由于这种生命不同于地球上以碳为基础的生命,于是兰顿把它称为"人工生命"(李建会,2001:1-5)。

人工生命没有考虑现实的以碳为基础的生命的运作问题,但它一开始就从计算的视角和方法来思考生命的本质问题。人工生命把生命的本质看作是一种形式,这种形式可以通过程序或算法表现出来。所以,在人工生命看来,生命的本质实际上就是一种算法。这种算法的运行就表现出生命。人工生命的很多研究就是通过计算机编程即寻找计算、算法的方法来揭示生命的本质的。算法、计算等概念已经成为理解生命本质的重要概念和方法。

与图灵提出人的大脑是一台离散态的计算机的思想几乎同一时期,计算机科学的另一个开创者冯·诺伊曼则开始从计算的视角思考生命的本质问题。20世纪40年代晚期,冯·诺伊曼在美国加州帕赛迪纳(Pasadena)的海克森(Hixon)研讨班上就这个课题做了一系列演讲,题目是"一般和逻辑的自动机理论"。海克森演讲的最核心问题是自我繁殖的概念。一个人工的机器能够繁殖它自己吗?当年笛卡尔在声称动物是机器的时候,就曾被这个问题所难住。但冯·诺伊曼要回答这个问题,他要找到自动机产生后代的条件,他要证明机器可以繁殖!

然而,冯·诺伊曼对他自己的动力学模型并不十分满意。他不能充分地获得最小的逻辑前提,因为该模型仍然以具体的原材料的吸收为前提。这使详细阐明机器运动的很多精确的简单规则变得非常困难。并且这些规则也必须包括自动机识别正确组成部分的能力。也就是说,它需要某种传感机制和协调得很好的运动控制功能,以保证这些组成部分能被有秩序地组装起来。所有这些使冯·诺伊曼感到,该模型没有很好地把过程的逻辑形式和过程的物质结构区分开。作为一个数学家,冯·诺伊曼需要的是完全形式化的抽象理论。他与著名的数学家乌拉姆(Ulam,S.)讨论了这些问题,乌拉姆建议他从细胞的视角思考这个问题。冯·诺伊曼接受了这个建

议,于是就有了元胞自动机(简称 CA)的开创性工作。

简单地说,CA 是由有限自动机的方格构成。有限自动机是机器的最简单的形式模型。有限自动机在给定时间只能处在有限状态中的一个状态之中,并且它从一个时间步骤到另外一个时间步骤的状态变换是由状态转换表决定的:给定特定的输入和特定的内在状态,状态转换表规定有限自动机在下一个时间步骤采取哪种状态。对 CA 来说,每一个格点表示一个细胞或系统的基元,每一个细胞都是一个很简单很抽象的自动机,每个自动机每次处于一种状态,下一次的状态由它周围细胞的状态、它自身的状态以及事先定义好的一组简单规则决定。所有的自动机遵循相同的转换表,在相同的时刻同时改变状态。1953 年,冯·诺伊曼在大量工作的基础上,终于得出与他的动力学模型等价的逻辑模型。

他的模型有 3 个组成部分:一是存储带(memory-tape),包含被建造机器的描述。如果是自繁殖的情况,那么存储带包含的是建构器自身的描述。二是建构器自身,一个非常复杂的能够解读存储带内容的机器。三是受建构器指导的建构臂,用来建构存储带所描述的机器后代。建构臂穿过空间移动,同时设定后代组成部分的值。

冯·诺伊曼模型的开始模式处在一个巨大的细胞阵列中,其中每个细胞可以有 29 种不同的状态。动力学模型中的物质运动过程,在元胞自动机中由细胞与细胞之间的信息传递过程取代。为了给自动机构造实际的规则或状态转换表,冯·诺伊曼假定他的基于细胞的形式体系具有足够的计算和建构能力。这样的建构在两个水平进行:①自动机实际的基本细胞阵列,以及②嵌入到基本的自动机中作为状态模式的“通用建构器”。这种模式本身构造了一个虚拟的自动机,用数学的语言说,它是以通用图灵机为基础的。这使高层信息处理过程的建构(比如过程控制的建构、复制、传递和信息存储)成为可能。

冯·诺伊曼的自我繁殖自动机观念虽然很伟大,但由于受计算能力的限制,并没有立刻引起人们的关注。直到 70 年代,由于剑桥大学约翰·康韦(J. Conway)的工作,元胞自动机的思想才再次激起人们研究的热情。康韦编制了一个名为“生命”的游戏程序,该程序由几条简单的规则控制,这几条简单规则的组合就可以使元胞自动机产生无法预测的延伸、变形和停止等复杂的模式。这一意想不到的结果吸引了一大批计算机科学家研究“生命”程序的特点,最后终于证明元胞自动机与图灵机等价。亦即给定适当的初始条件,元胞自动机可以模拟任何一种计算机。

80 年代,斯蒂芬·沃弗拉姆(Wolfram,S.)对元胞自动机(CA)做了全面

的研究(1984)。他将元胞自动机分成四种类型:类型Ⅰ,CA演化到一个均质的状态;类型Ⅱ,CA演化到周期性循环的模式;类型Ⅲ,CA的行为变成混沌;类型Ⅳ,CA的行为展现出局域化的和持续的结构,特别是其中有些结构具有通过CA的网格传播的能力(李建会,2002,博士论文)

为什么有些元胞自动机能够产生很有意义的结构,而另外一些却不能呢?这个问题吸引了克里斯·兰顿。兰顿定义了一个参数作为元胞自动机活动性的一个测量。兰顿用不同的参数值做了一系列试验,结果发现,当细胞活动水平非常低时,元胞自动机倾向于收敛到单一的、稳定的模式;如果活动性非常高,无组织的、混沌的行为就会发生;只有对于中间层次的活动性,局域化的结构和周期的行为(类型Ⅱ和类型Ⅳ)发生。兰顿因此把类型Ⅳ的CA看作是表达了部分发展的混沌行为,并因此把它们称为处于"混沌边缘"的CA(沃德罗普,1997,321)。在混沌的边缘,既有足够的稳定性来存储信息,又有足够的流动性来传递信息,这种稳定性和流动性使得计算成为可能。在此基础上,兰顿作了一个更为大胆的假设,认为生命或者智能就起源于混沌的边缘。正是在这样的思想的指导下,兰顿提出了他的人工生命理念。兰顿认为,生命的本质不在具体的物质,而在物质的组织形式。生命并不像物质、能量、时间和空间那样,是宇宙的基本范畴,而只是物质以特定的形式组织起来派生的范畴。这种组织原则完全可以用算法或程序的形式表达出来。所以,只要能将物质按照正确的形式构筑起来,那么这个新的系统就可以表现出生命。而这种所谓的"正确的形式"就是生命的算法或程序。所以,算法和程序是把非生命和生命连接起来的桥梁,是生命的灵魂。

六、计算方法的一般方法论意义

长期以来,算法和计算等概念一直与人类的认识活动相联系。计算机带给人类思维的最大冲击莫过于将这些范畴和方法泛化到了自然界。我们知道,自然界的事件都是在自然规律作用下的过程。计算机科学给我们的一个启示是,特定的自然规律实际上就是特定的"算法",特定的自然过程实际上就是执行特定的自然"算法"的一种"计算"。这样来看,在我们的周围就存在着形形色色的"自然计算机",生命和心灵也不例外。因此,计算方法就具有了普遍的一般方法论的意义。

人类最早从计算的角度和方法审视问题的是关心人的认识本质的哲学家。洛克曾把思维的本质看作是计算;莱布尼兹也认为,一切思维都可以看作是符号的形式操作的过程。不过,真正把思维理解为计算,并付诸实施的是人工智能领域的科学家。人工智能的先驱图灵认为,人类的大脑应当被

看作是一台离散态机器。尽管大脑是由粘乎乎的"凉粥"一样的物质组成，电子计算机是由生硬的金属物质组成，但人与它们的本质则是相同的。离散态机器的行为原则上能够被写在一张行为表上，因此与思想相关的大脑的每个特征也可以被写在一张行为表上，因而能被一台计算机所仿效。在1950年发表的论文中，图灵详细论证了心灵的计算本质，并批驳了反对机器能够思维的多种可能的意见。在图灵的影响下，麦卡锡、明斯基、西蒙和纽厄尔等人开创了人工智能这样一门新的学科，他们都把心灵的本质看作是计算，把思维看作是一种信息加工的过程。

不只人工生命的科学家把生命的本质看作是算法；几乎同一时期，一些生物学家也开始从计算的视角来思考生命的问题。1994年11月，美国科学家阿德勒曼（Adleman. L. M.）在《科学》杂志上发表的关于DNA计算机理论，从另一个方面说明了生命的算法本质。我们一般人一看到"计算机"这几个字，可能立刻会想起键盘、显示器、存储器等内容。计算机的普及已经使我们习惯了这样一个概念：计算是通过硅片上的电子组件进行的。但是，阿德勒曼反问道：计算非得采用这样一种方式不可吗？他说："或许我们对计算的看法过于狭隘了。如果计算无处不在，而且能够表现为多种形式，情况又如何呢？是否可能存在一种由相互作用的分子进行计算的液体计算机呢？答案是肯定的。"（Adleman，1998：54-61）通过把图灵机与生物细胞内DNA自我复制过程的比较，阿德勒曼得出细胞就是计算机的思想。不过，阿德勒曼进一步认为，通过适当的方法完全可以设计出用DNA进行计算的生物计算机。

一旦从计算的视角审视世界，科学家们不仅发现大脑和生命系统是计算系统，而且发现整个世界事实就是一个计算系统。当康韦证明元胞自动机与图灵机等价时，就有人开始把整个宇宙看作是计算机。因为特定配置的元胞自动机原则上能模拟任何真实的过程。如果真是这样，那么，我们便可以设想一种元胞自动机，它能模拟整个宇宙。实际上，我们完全可以把宇宙看作是一个三维的元胞自动机。基本粒子或其他任何层次的物质实体可以看作是这个元胞自动机格点上的物质状态，支配它们运动变化的规律可以看作是它们的行为规则。在这些规则的作用下，宇宙中的基本粒子发生各种变化，从而导致宇宙的演化。后来兰顿又指出，处于混沌边缘的元胞自动机不仅可以做复杂的计算，而且可以支持生命和智能。从这里我们可以了解到，宇宙这个巨大的元胞自动机事实上是一个处于混沌边缘的元胞自动机，因为它不仅产生了生命，而且产生了智能。

总之，计算或算法的观念在当今已经渗透到宇宙学、物理学、生物学乃

至经济学和社会科学等诸多领域。计算已不仅成为人们认识自然、生命、思维和社会的一种普适的观念和方法，而且成为一种新的世界观。我们完全有理由相信，整个世界都是由算法控制，并按算法所规定的规则演化的。宇宙是一部巨型的计算装置，任何自然事件都是在自然规律作用下的计算过程（李建会，2004：70）。现实世界事物的多样性只不过是算法的复杂程度的不同的外部表现。整个世界的演化：从虚无到存在，从非生命到生命，从感觉到思维，实际上都是一个计算复杂性不断增加的过程。不仅生命和思维的本质是计算，自然事件的本质也是计算。这或许是当今生命科学和相关的学科给我们的最大的启示。

第五节　复杂性科学与虚拟方法

在科学活动中，我们很少对研究对象进行完全直接的研究，相反，我们往往用某种替代物或过程来替代原来的对象，这也就是我们的科学实验。在实验中，我们采用“模拟”的方法来探索研究对象的现象与规律。实验作为实践的一种形式，在科学研究中起着探索和检验知识的作用。在计算机出现以前，实验有两种形式：实物实验和思想实验，一般所指的科学实验是实物实验。计算机出现之后，虚拟实验和虚拟方法就成为一种新的实验形式和研究方法（林夏水，1998：17-24）。

一、模拟·计算机与虚拟方法

“模拟”一词在拉丁语中是“伪造”、“模仿”的意思（霍兰，2000：141）。所谓“模”就是以某种东西来做模型，而“拟”的意思是拟合、仿照，因此，从广义上来说，模拟就是用一种实物或过程来模仿另一种实物或过程。在计算机出现以前，所谓模拟都是实物性的模拟，也就是用某种实物来模拟另一种实物。例如，我们可以建立一个风洞实验室来模拟飞机在天空中的实际飞行，让飞行中可能出现的各种问题尽量在风洞实验室中出现，并提出其解决的方案。在不断变化的科学世界中，新工具常常导致重大的发现，从而戏剧性地改变我们的认识。由于计算机特别是电子数字计算机的出现，实验的手段和方式也发生了重大改变。

用数字电子计算机来模拟真实的对象,都是要把对象信息转化成计算机能够处理的数字信息。从计算机存储器中的位和字节出发,研究人员正在崇尚真实世界的一种硅替身——精致的"人工世界",这使他们可以完成在"肉体形式"下不太现实、代价过高,或者在某些情况下过于危险的实验。从新药品的仿真测试到行星和星系的创生模型,以及计算机化培养皿中生长的数字生命形式,这些未来的实验室是一种有争议的新科学方法的重要工具。这种新方法不是基于直接的观察与实验,而是基于从真实空间向虚拟空间的映射。在这里,诞生了科学研究的一种新方法——模拟方法。由于计算机模拟的数字虚拟特征,我们也一般把模拟方法称之为"虚拟方法"。这里所说的虚拟方法又称计算机模拟或系统仿真,是指在计算机上对实际系统(包括设计中的系统)的数学模型进行模拟实验,从而达到研究一个已存在的或设计中的系统的目的。虚拟和仿真经常联系在一起,不过它们虽然有一定的联系,但仿真强调的是用计算机对真实世界的模仿,而虚拟则强调利用计算机建构出现实世界中原来没有的东西。本文中我们不作详细的区分。

虚拟方法与计算机的发展是紧密联系的。20 世纪 40 年代中期,电子模拟计算机的出现使得用数学方法模拟大量试验成为可能。诺伊曼和乌拉姆在原子弹研究中,就利用计算机模拟中子在裂变物质中随机扩散的某些概率计算问题。这是最早出现的计算机模拟仿真。其后随着计算机的进步促使模拟机、数字机、混合机到全数字机的发展,计算机仿真也就经历了模拟仿真、数字仿真、混合仿真到全数字仿真。

美国圣菲研究所的霍兰对计算机模拟的本质进行了探讨,认为"模拟的本质是把要模拟过程的各部分与称作于例程(subroutines)的计算过程的各部分联系起来的一种映射。这个映射包括两部分:①把过程的状态与计算中的数字联系起来的一种固定的对应关系;②一组把动态过程与计算进程联系起来的定律"(霍兰,2000:140)。把计算机视为模拟其他设备的设备,对基于计算机的思想实验的概念是十分关键的,因此把这种应用与计算方法区分开来非常重要。模拟的常规方法是把要模拟的过程分成若干部分,然后建立一个固定的对应关系,把每个部分的可能状态与一系列数字联系起来,就像数学模型那样(霍兰,2000:142)。虚拟世界所映射的最为振奋人心的领域,是"复杂适应系统"的新疆域。这些系统(从环境生态系统到市场经济系统)涉及活的"主体",它们以多种方式不断改变自身的行为,这些方式无法用科学的旧规则进行预测和测量。科学家们的探索代表了 21 世纪科学发现的新视野,而模拟仿真世界正在绘制航向图。

二、虚拟方法与复杂性科学

17 世纪前半叶,伽利略创建了受控实验的科学方法,这种方法是近代科学产生和发展的主要动力。它不仅产生了伽利略的运动学、牛顿的力学、拉瓦锡的氧化燃烧学说、法拉第的电磁理论等物理科学,而且产生了生理学、遗传学、分子生物学、心理学等生命科学。可以肯定,这种方法仍然是推动现代自然科学向前发展的不懈动力。然而,从第二章第二节的复杂系统的特征描述中,我们可以看出,对复杂系统的研究如果沿用传统的方法往往是难于奏效的,我们根本无法用传统的方法对它进行受控实验。其中原因是多方面的,比如,遥远的星系中旋转着的巨大气体云,据认为,它们往往在引力的作用下收缩成高密度的集结物,并最终成为恒星的中心团块,其周围围绕着它旋转的较小团块最后变成伴随该恒星的行星系统。很显然,对这种说法没有人能够用实际的实验来检验。又如,假设排放到大气中的二氧化碳的总量是当前的 2 倍,这将给今后的 50 年的全球平均温度带来什么样的影响,这是气候学家用来描述全球变暖问题的一个标准设想。对该问题的回答多种多样:从根本不产生影响,到温度升高摄氏 5 度,产生所谓的温室效应。究竟哪种说法正确,没有人可能对此进行真实的实验。因此,没有人知道真正的结果会是如何。然而,我们几乎每一个人对此都十分关心,因为大气的温度升高会对从农业收成到南北极冰盖的继续存在等各方面产生显著的影响。再如,在很短的时间内上升 500 个基点,以检验关于货币和股票价格波动的某个新理论,可以肯定,任何一个国家的金融机构都不会同意。这种系统的运作对人们的日常生活太重要,任何人都不敢贸然做这类实验。还有一些情况,比如核反应堆,因过于危险,或者代价过于昂贵,因此关于它的许多想法并不能直接用实验加以检验。

面对复杂系统,做直接的受控实验不太现实,我们不得不采用虚拟方法。借助计算机的虚拟方法弥补了直接实验或受控实验的缺憾,使得复杂系统的实验检验成为可能。难怪卡斯蒂对计算机的出现以及虚拟方法的采用给予了崇高的评价,认为今天我们借助于计算机这一新工具,科学家们正在掀起一场科学革命,其深远意义恰如当年伽利略的望远镜所引发的科学革命(卡斯蒂,1998:37)。

在《虚实世界》一书中,卡斯蒂带领我们走过一段浏览到许多不寻常硅化的微观世界这一令人着迷的旅程,向我们展示它们如何被用来建立重要的新理论,如何解决一些实际问题。我们访问“Tierra”(一个“计算箱”),人工生命在其中形成生长和突变的生物形态,它揭示自然选择和进化的新观

点。我们玩一场“均势”游戏，一个刻画地缘政治复杂力量的仿真程序。我们还“驱车”途经了“TRANSIMS”（新墨西哥州阿尔布开克市的一个模型），寻找交通阻塞和交通事故等事件的根源。可以说，复杂性科学与虚拟方法有十分密切的关系，复杂性科学的理论检验往往都借助于虚拟仿真的方法。虚拟仿真之于复杂性科学，就像观察和受控实验之于传统科学研究。

三、虚拟方法与复杂适应系统

复杂适应系统由于涉及多主体并与环境适应和进化，因此传统的还原论式的研究方法难于对它进行全面的描述，于是霍兰构造了用于描述 CAS 的 4 个特性（聚集、非线性、流、多样性）和 3 个机制（标识、内部模型、积木），并希望通过这 7 个构件寻找到支配 CAS 行为的一般原理，使我们能从简单的规律中，综合出复杂的 CAS 行为。复杂适应系统与大多数已被科学地研究过的系统不一样。在变化的背后，通过有条件的动作和预知，它们在没有中枢指挥的情况下仍然呈现出协调性，并且还有杠杆支点，在支点处一个微小的输入便会产生巨大的变化。霍兰为此构造了回声模型，认为是回声导致了涌现的出现。

霍兰的回声模型是基于其遗传算法的主体适应模型。用“资源”和“位置”两个概念来反映环境的影响，主体要有三个基本部分：①进攻标识；②防御标识；③资源库。主体的基本功能包括：主动与其他主体接触，同时又对其他主体的接触进行应答，如果匹配成功则进行资源交换，在自己内部存储与加工资源，如果资源足够，则繁殖新的主体。最基本的回声模型是：整个系统包括若干个位置，每个位置中有若干个主体，主体之间进行交往——交流资源和信息。在此基础上，还需有交换条件、资源转换、粘着、选择交配、条件复制等机制。这样的回声模型就具备了描述和研究各种复杂系统的能力。但是，霍兰的回声模型如何得到检验呢，若使用传统的观察和受控实验的方法，我们无法作检验，但计算机的虚拟仿真却能显示它具有的独特优势。

为了检验回声模型的可行性，圣菲研究所开发了一个计算机的软件平台——SWARM（许国志，2000：270-271）。在这个平台上，回声模型的大部分功能都得到了实现，也基本上验证了霍兰所构造的复杂适应系统的可行性和正确性。SWARM 的模拟思想是建立一系列独立的个体，通过独立事件之间交互作用，考察和研究系统的行为和演化规律。SWARM 模拟的基本单位是个体，一个个体就像系统中的一个演员，它能够产生动作并影响自身和其他个体。模拟包括几组交互作用的个体。例如，一个生态系统的模拟可以

包括狼、兔子和胡萝卜。在一个经济学模拟中,个体则是公司、证券代理人、分红利者和中央银行。个体之间独立的、交互的模拟与连续的模拟不同。在连续系统模拟中,模拟现象往往是一组有关联的等式间的数量关系。

个体定义了 SWARM 系统中的基本对象,即模拟部件,时间表则定义这些对象之间的事件发生的流程。在 SWARM 中,特定的行为发生在特定的时间,行为的发展按照时间表的规定进行。时间表是一个数据结构,包含了各种事件的执行顺序。例如,在狼/兔子这个模拟系统中就可能有三种行为:"兔子吃萝卜","兔子躲避狼的追踪"和"狼吃兔子"。每种行为是一个独立的动作。在时间表中,对这三种行为按照以下顺序排序:"每天,兔子先吃胡萝卜,然后它们躲避狼的追踪,然后狼试图吃兔子。"模型将按照这种安排好的事件的执行顺序向前发展。

回声模型的大部分设想都已经在计算机中进行了虚拟仿真,由于其仿真过程更加复杂,在这里就不进行详述。这里我们说说霍兰与圣菲研究所的阿瑟(Arthur,B.)创建的一个真实的复杂适应系统的仿真案例——人工股市(卡斯蒂,1998:85)。1987 年,霍兰和阿瑟在一次谈话中萌发了创建一个人工股市的设想,以便用来回答金融领域困惑人们几十年的一系列问题。随后他们就开始了对人工股市的研究与实现。这一年的 10 月 19 日,星期一,是美国股市最惨痛的一天。纽约股市 1 天内令人震惊地下滑了 22.6 个百分点。为了防止在"黑色星期一"看到的这类恐慌,纽约股市的董事会制订了上限条款规则,即当道-琼斯平均指数从上一个收盘点上升或下滑超过某一点时,禁止某一类型的交易。在刚刚引入这些规则时,没有人知道它们是否会得到预期的结果,即能否使投资者暂停,反省他们的行为,而不是盲目地跳进一个混乱的股市并随波逐流。有很多投资者甚至担心,这些规则会加剧股市的混乱。这些担心是多余的吗?当时人们并不确切地知道结果会如何。对交易所董事们来说,增加上限条款只不过是成败参半的冒险。然而,借助于阿瑟等人所拥有的仿真程序,上述日子一去不复返了。我们可以利用我们计算机中的替身世界,进行可重复的受控科学实验,以检验这些规则的成败。

四、虚拟方法与人工生命研究

人工生命一方面以计算机为工具,力图在计算机或现实世界中创造出具有生命特征的人工实体;另一方面,它又从计算的视角理解生命,把生命的本质看作是一种特殊的算法。人工生命研究有两条径路,现实人工生命和虚拟人工生命(李建会,2002:博士论文,48-72)。现实人工生命研究主要

采取硬件的方式在现实世界中创造展示生命特征的人工实体。采取这种径路来研究生命的难度比较大,不容易实现,在早期的机器人研究中失败的案例比较多。现在已经主要采取虚拟的人工生命研究径路。虚拟人工生命的研究径路主要采取软件的形式利用计算机创造人工生命实体,这条径路因为在虚拟的计算机世界中实现,成本低,实现人工生命设想的可行性更大,因此目前成了人工生命研究的主要形式。目前已经有了比较成功的模型,比如 Tierra、"阿米巴世界"等。

人工生命研究试图把生命的本质从具体的生命形式中剥离出来,也就是发现目前碳水化合物的现实生命形式背后的规律,把构成生命的组成材料(即硬件)和构成生命的组织规律(即软件)分开,用计算机或其他技术重构生命的表现形式。这样,利用计算机探索、重构和演示由人工构造的生命形式就成了研究的重点。还在计算机发展的早期,冯·诺伊曼、图灵等计算机的先驱者们试图用计算机来探索人类的智能活动和生命的奥秘,构造出著名的元胞自动机模型(CA)。后来,康韦、沃弗拉姆和兰顿等人对它做了进一步的发展。1970 年剑桥大学的康韦编制了一个名为"生命"的游戏程序,该程序由几条简单的规则控制,这几条简单规则的组合就可以使元胞自动机产生无法预测的延伸、变形和停止等复杂的模式。这一意想不到的结果吸引了一大批计算机科学家研究"生命"程序的特点。1980 年代,沃弗拉姆对元胞自动机做了全面的研究,把元胞自动机细分为四种类型,并探索了出现生命特征的元胞自动机的演化生长规律。随后,圣菲研究所的兰顿则更进一步,在计算机中玩起了生命游戏,发现了生命出现在确定和混沌之间的混沌边缘,对人工生命进行了全面的探讨,并由此掀起了在计算机中对人工生命进行虚拟仿真的热潮。

1987 年,兰顿组织召开了首届"人工生命——生命系统合成与仿真"的国际研讨会,以期实现他多年梦想的在计算机中创建"以硅为基础的生命的设想"。这次研讨会取得了巨大的成功。会场上展示了许多计算机仿真的人工生命系统,从蚂蚁王国的集体行为、蛋白质分子的自组织到生态系统的计算机演化等等,无所不包。其中最引人注目的是曾写作《自私的基因》而名扬天下的牛津大学著名生物学家道金斯(Dawkins,R.)演示的一个程序,它反复对一个初始模拟生物形态使用若干简单的规则的方法,居然在计算机上描绘出与真实生物界惊人相似的生命演化和灭绝的过程。另一个引人注目的实验是雷诺尔兹的鸟群模型,这个模型只用简单的几条规则就生动地在计算机中再现了鸟群的集群行为及其躲避障碍物的行为。自 1987 年之后,生命的合成和虚拟仿真的研究快速发展,取得了很多有价值的成就。

兰顿认为，计算机硬件经过适当的组织就可以获得生命和智能。他说："人工生命研究的最终目标使在其他媒体，理想地使在虚拟的媒介中创造出'生命'，其中生命的本质已经从他的特殊硬件的实现中抽取出来。我们将建造如此似生命的（计算机）模型，以至于它们不再是生命的模型，而变成了生命自己的实例。"（Langton，1986：120-149）人工生命没有考虑现实的以碳为基础的生命的运作问题，而是一开始就从计算的视角来思考生命的本质问题。人工生命把生命的本质看作是一种形式，这种形式可以通过程序或算法表现出来。依人工生命看来，生命的本质实际上就是一种算法。这种算法的运作就表现出生命。人工生命的很多研究就是通过计算机编程的方法揭示生命的本质的。由此可以看出，在人工生命研究中，虚拟仿真方法具有重要的地位。可以说，人工生命研究主要就是应用虚拟仿真的方法。

五、虚拟方法的一般方法论意义

电子计算机的发明对科学技术的发展具有重要的意义，约翰·卡斯蒂把它比做 17 世纪的望远镜的发现和实验科学的兴起。计算机的发展使我们拥有了一种新的工具。借助它，我们可以构造复杂的真实世界的硅替身，由此，在真实世界和数学世界之外，又出现了一个新的人工世界。卡斯蒂（1998：218）把它称为"计算世界"，而有更多的人则把它称为"虚拟世界"或"虚拟实在"。迈克尔·海姆（2000：111-130）把虚拟实在定义为"实际上而不是事实上为真的时间或实体"，并用七大特征来描述虚拟实在的本质：模拟性、交互作用、人工性、沉浸性、遥在、全身沉浸和网络通讯。在这个虚拟的世界里，"我们不再被迫生活在假言性的阴暗世界中，或仅仅敲下实际系统的碎片，孤立地研究这些碎片，期望可以将这一大块片面的知识重新拼成对整体系统本身的理解"。相反，"借助于刚刚得到的可以在计算机中创建各种情形下世界的新能力，我们可以与真实的复杂系统展开大量的'假定'推测型游戏，再不必将系统划分为简单的子系统，更不必因为实验耗费过大、过于不现实，或者过于危险而干脆放弃实验知识"。"我们现在拥有了一种必要的工具，可以用来建立复杂系统的理论，这些理论最终可以与牛顿及其继承者所发展的用来描述简单质点系统的力学过程的理论相媲美。"（卡斯蒂，1998：38）

虚拟方法除了在复杂性科学中占有重要的地位外，在其他科学研究中也越来越重要。林夏水（1998：17-24）研究员比较了实物实验、思想实验和计算机实验，证明计算机实验是一种独立的实验新形式。他认为，计算机实验的出现扩大了科学实验概念的内涵，把传统的科学实验概念（即实物实验）

拓展到包括计算机实验在内的更广泛意义的科学实验。Eric Winsberg (2003:105-125)也认为,虚拟方法和虚拟世界是理论和实验之外的一种全新的科学活动,是第三种科学研究新形式,是科学研究的新方法。这种新方法除用于复杂系统的研究之外,在科学研究的许多领域都有着广泛的应用。

总之,计算机实验和虚拟方法的出现正在改变着人们的思维方式。人脑具有逻辑思维、形象思维和直觉思维的机能;电脑(即计算机)具有高速逻辑运算的功能,而且记忆量大,但不能进行灵感的、直觉的和形象的思维,不能理解知识。虚拟方法正是人利用自身的灵感、直觉和形象的思维能力,通过电脑对复杂数据信息进行可视化、操作和交互的一种全新方式。人们正是利用人脑和电脑各自的优点,才创造出实验数学、科学可视化、虚拟方法以及虚拟现实等新的科学研究方法。虚拟方法在科学研究中将占据着越来越重要的位置,并给科学研究带来新的飞跃,因此,虚拟方法应该纳入科学研究的一般方法论系列,是科学研究的一种全新的方法。

第六节　复杂性科学与综合集成方法

复杂性科学的对象是复杂系统。要研究这样的系统,以上介绍的各种复杂性科学方法如果单独使用,可能都难于胜任,需要综合各种方法的优势,形成新的研究方法。这里将要讨论的综合集成方法(简称集成方法)就是这样一种新方法。所谓集成方法,从广义上来说,就是把复杂性科学的各种方法都综合起来,发挥各自的优势,克服其弱点而形成的某种真正的综合方法;从狭义上来说,就是我国钱学森先生及其讨论班的中国学者针对开放的复杂巨系统而提出的一种方法论。在这里,由于时间和精力的限制,我们只从狭义上来探讨钱学森先生所提出的集成方法。

一、综合集成方法的提出及其依据

20 世纪 80 年代末,钱学森明确提出,处理开放的复杂巨系统的方法论是"从定性到定量的综合集成方法"(以下简称综合集成方法),后来又发展到"从定性到定量综合集成研讨厅体系"的实践形式。这套方法是从整体上研究和解决问题的方法,采用人—机结合以人为主的思维方法和研究方式,

对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成，达到对整体的定量认识。这些思想的提出也有一个发展的历程。

20 世纪 80 年代初，结合现代作战模型的研究，钱学森提出了处理复杂行为系统的定量方法论。这种定量方法论是半经验半理论的，是科学理论、经验和专家判断力的结合。与此同时，钱学森大力推动系统工程在社会系统中的应用。系统工程中的应用已被实践证明是非常有效的，如美国的“阿波罗”计划，中国的“两弹一星”，都是成功的范例。但用这些方法解决社会系统工程问题显然是不够的。即使像数学这样广泛使用的理论和方法，也遇到严重困难，因为复杂巨系统特别是社会系统无法用现有的数学工具描述出来。“当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时，容易注意于数学模型的逻辑处理，而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道，这样的数学模型，看来‘理论性’很强，其实不免牵强附会，从而脱离实际。与其如此，反不如从建模的一开始就老老实实承认理论不足，而求援于经验判断，让定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充，是很重要的。”（钱学森，1988：增订本说明）

80 年代中期，在钱学森指导下，系统学讨论班进行了开放的复杂巨系统方法论的探讨，考察了各类复杂巨系统研究的新进展，特别是社会系统、地理系统、人体系统和军事系统 4 个方面：

（1）在社会系统中，为解决宏观经济决策问题，在马宾等经济学家与当时航天部 710 所的联合研究中，由几百个变量和上千个参数描述的、定性与定量相结合的系统工程技术的应用研究。

（2）在地理系统中，用生态系统、环境保护系统以及区域规划等综合探讨地理系统的研究和应用。

（3）在人体系统中，把生理学、心理学、西医学、中医学和传统医学等综合起来的研究。

（4）在军事系统中，军事对阵系统和现代作战模型的研究。

在对这些研究进展进行提炼、概括和抽象的基础上，80 年代末，钱学森等人（1990：3-10）提出处理开放的复杂巨系统的方法论是“从定性到定量综合集成方法”（meta-synthesis）。作为一门技术，又称为综合集成技术；作为一门工程，亦可称综合集成工程。

在这些研究中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力（专家的知识、智慧和创造力）相结合，形成和提出经验性假设，如判断、猜想、方案等。在自然科学和数学中，这类经验性假设一般是用严密逻辑推理和各种实验手段来证明其正确与否。这一过程体现了从定性到定量的特点。但它们用到

的各种方法来解决复杂巨系统问题时，由于复杂巨系统跨领域跨学科跨层次的特点，这些方法就显得力所不逮了。可是我们对经验性假设又不能只停留在思辨和定性描述和议论上，因为那样还不能从整体上定量回答问题。但是，现代科学技术以及基于计算机的信息技术的发展，为我们开辟了新的途径，这就是人—机结合以人为主的思维方式和研究方式。我们可以根据整个系统的观测资料（统计数据和各种有关的信息资料），建立包括大量数据的系统模型（充分利用现代数学工具和计算机的各种建模方法），而这些模型必须建立在对系统的实际理解和经验上，以保证模型的合理性和精度要求。通过计算机仿真、实验和计算获得定量结果，同时充分利用知识工程和专家系统等人工智能技术、信息技术，以人（专家体系）为主实现人—机结合与融合，进行知识的综合集成。这里包括了科学的和经验的知识、理性和感性的知识、定性和定量的知识，实现从经验到理论，从定性到定量的优化，达到整体的定量认识，从而对经验性假设的正确与否作出明确结论，这样的结论就是现阶段对客观事物认识的科学结论。

这里的人—机结合与融合，实际是人脑的信息加工与计算机信息加工的结合与融合。思维科学研究表明，人脑和计算机都能有效处理信息，但两者有很大差别，各有各的优势。人脑思维的一种是逻辑思维，它是定量的宏观的信息处理方式；另一种是形象思维，它是定性的宏观的信息处理方式。人的创造性主要来自创造性思维，它是逻辑思维和形象思维的结合，也就是定性与定量、宏观与微观相结合的信息处理方式。今天的计算机技术在逻辑思维方面确实能做很多事情，甚至比人脑做得还好，已有很多科学成就证明了这一点，如数学家吴文俊的定理机器证明。但在形象思维方面，目前的计算机还不能给我们以任何帮助，至于创造思维只能依靠人脑了。以人为主的人—机结合是把人脑的优势和机器的优势都能充分发挥出来，优势互补，相辅相成，人机相帮，和谐工作。这个人—机结合的系统在思维能力和创造性方面，比单纯依靠人（专家）要强，比单纯靠机器就更强，因而具有较强的处理复杂性问题的能力。钱学森认为，从这个角度来看，希望靠机器（计算机）来解决复杂性问题，至少目前是行不通的。圣菲科学家们走了一条人—机结合以机器为主的技术路线，是导致他们困惑的主要原因。

1992 年，钱学森（2001:428）又进一步提出“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”的思想。他认为，这个思想是下列成功经验的汇总和升华，即：①几十年来世界学术讨论的 Seminar 的经验；②从定性到定量的综合集成方法；③C^3I 及作战模拟；④情报信息技术；⑤人工智能；⑥灵境（Virtual Reality）技术（即虚拟实在）；⑦人—机结合的智能系统；⑧系统学；⑨第五次产业

革命的其他技术。

二、综合集成方法的要旨

综合集成方法的实质是把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系结合起来，构成一个高度智能化的人—机结合系统，这个方法的成功应用，就在于发挥了这个系统的综合优势、整体优势和智能优势。它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息等通通集成，从多方面定性认识上升到定量认识。按照我国传统说法，把一个复杂事物的各个方面综合起来，达到对整体的认识，称之为“集大成”的智慧，所以钱学森把这个方法称为“大成智慧工程”(meta-synthetic engineering)。

这个方法体现了“精密科学”从定性判断到精密论证的特点，也体现了以形象思维为主的经验判断到以逻辑思维为主的精密定量论证过程。所以，这个方法是走精密科学之路的方法论。它的理论基础是思维科学，方法基础是系统科学与数学，技术基础是以计算机为主的信息技术，哲学基础是实践论和认识论。

需要指出的是，应用这个方法论研究问题时，也可以进行系统分解——在系统总体指导下进行分解，在分解后研究的基础上，再综合集成到整体，实现一加一大于二的涌现，达到从整体上严密解决问题的目的。从这个意义上说，综合集成方法吸收了还原论和整体论的长处，同时也弥补了各自的局限性，它是还原论和整体论的结合。

钱学森提出，“从定性到定量综合集成研讨厅”和“从定性到定量综合集成研讨厅体系”(以下简称研讨厅和研讨厅体系)是实现综合集成方法的实践形式，并把运用这套方法的集体称为总体设计部。它是将有关的理论、方法与技术集成起来，构成一个供专家群体研讨问题时的工作平台。不同的复杂系统或复杂巨系统，研讨厅的内容是不同的，即使同一个复杂系统或复杂巨系统，由于研讨问题的类型不一样而有不同的研讨厅，如研究社会系统中的各类问题便是。当把这套方法用于国家各个层次的决策支持时，中央、地方和各部门都可有自己的研讨厅和总体设计部，由于信息网络的出现和发展，可以用信息网络把这些分布式的研讨厅联系起来，就形成了研讨厅体系，不仅信息交流快捷而方便，而且网上资源丰富并得以共享。这样的研讨厅体系，实际上是个人—机结合、人—网结合的信息处理系统、知识生产系统、智慧集成系统，是知识生产力和精神生产力的实践形式。

研讨厅和研讨厅体系从结构上看，由以下几个部分构成(图 4.6)(于景元，周晓纪，2002:28-30)：

（一）专家体系

复杂系统或复杂巨系统的研究通常是跨学科、跨领域的交叉性和综合性研究。需要由不同学科、不同领域的专家组成专家体系，这个专家体系具有研究复杂系统或复杂巨系统所需要的合理知识结构。在实际应用中，专家体系还要考虑到部门结构、年龄结构等问题。

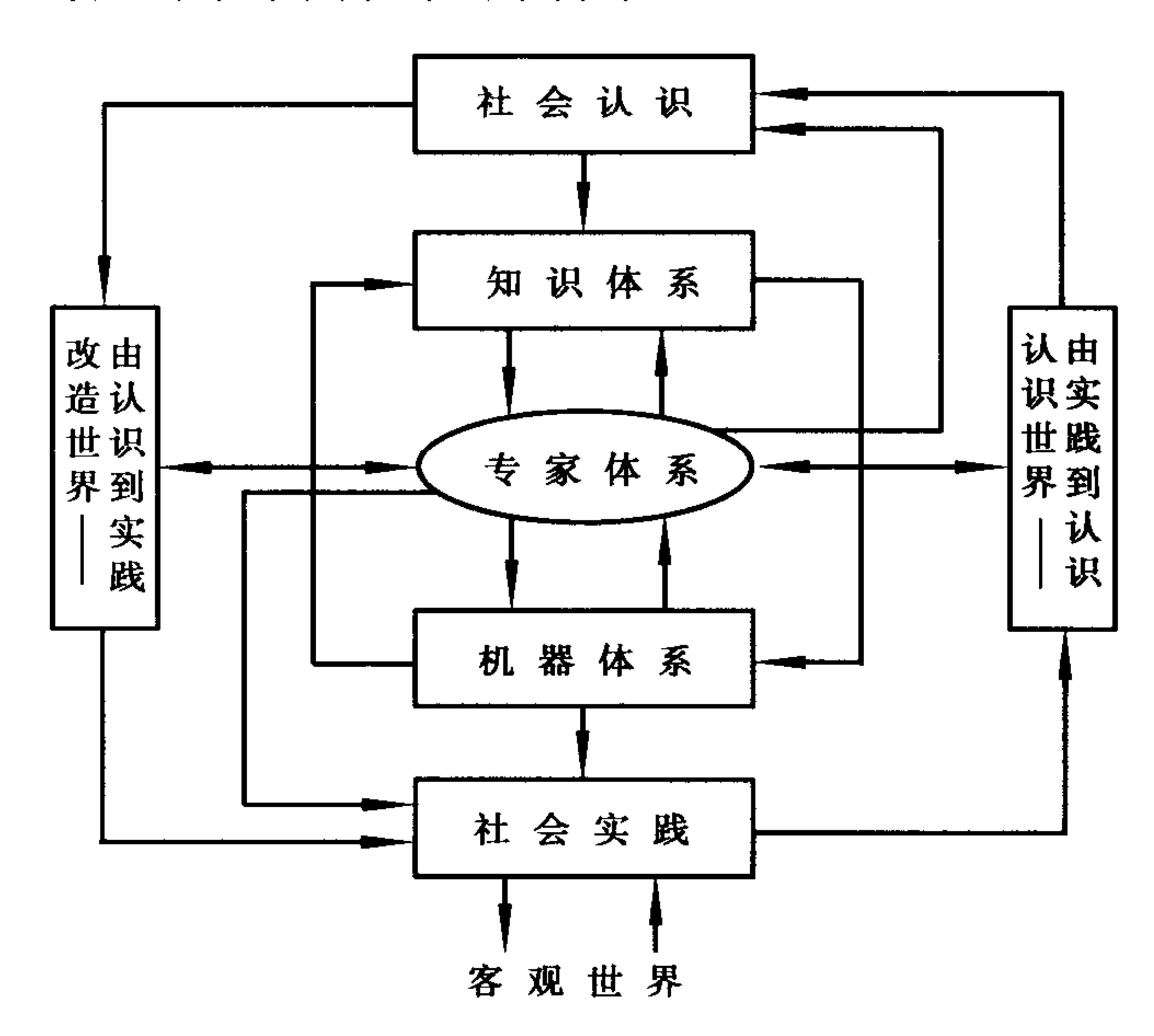


图4.6　综合集成方法的研讨厅体系

人—机结合以“人”为主，“人”就是指专家体系。因此，专家体系的整体水平和素质对研讨问题是非常重要的。由于研究的复杂系统或复杂巨系统不同，专家体系的结构也不一样，因此专家体系的结构是动态变化的。

（二）机器体系

以计算机软硬件和网络等现代信息技术的集成与融合所构成的机器体系，是研讨厅的重要组成部分。从总体上来说，机器体系结构与功能的设计应结合所要研究的复杂系统或复杂巨系统的实际，以综合集成的思想和方法为指导来进行系统设计。在网络环境下，研讨厅是个开放系统，机器体系，以及与其联网的网上资源是支持复杂系统或复杂巨系统研讨所需要的各种资源基础。如数据和信息资源、知识资源、模型体系、方法与算法体系

等。特别是在人、机交互过程中,机器体系应具有更强的动态支持能力,如实时建模和模型集成。这样的机器体系和专家体系结合起来,形成"人帮机,机帮人"的和谐工作状态。这也是研讨厅不同于一般的 MIS 和 DSS 的一个重要特点。

还应该强调的是,机器体系不仅是开放系统,同时也是个动态发展和进化的系统。随着以计算机为主的现代信息技术的迅速发展,许多涌现出来的高新技术,将不断地集成到机器体系之中,使得机器体系结构不断进化,功能不断加强,人、机交互能力也越来越强。

(三)知识体系

研讨厅是人—机结合的知识生产系统。知识扩大再生产所用到的知识资源就是人类知识体系。就整体而言,人类知识体系是由前科学、科学、哲学三个层次的知识构成的,前科学主要指经验知识、感性知识。科学知识现在已发展成为现代科学技术体系,由应用技术、技术科学、基础科学三个层次和 11 大科学技术部门所构成(黄欣荣,2004:42-46)。哲学不仅是知识,还是智慧,特别是马克思主义哲学是人类知识的最高概括,也是人类智慧的最高结晶。这是人类长期社会实践所获得的宝贵知识资源,而且这个体系是不断发展的。

一个研讨厅所存储的知识资源可能是直接与所研究的复杂系统有关的那部分知识,其他知识如需要可通过网络方式从网上获取。专家体系和机器体系是知识体系的载体。

综合集成方法是实现人—机结合,获得知识和智慧的复杂性科学方法。从实践论的观点来看,人类认识客观事物总是遵循着从实践到理论,从感性和经验到理性和科学的提升;对于复杂系统或复杂巨系统研究来说,还要实现从定性到定量的认识与升华过程。综合集成方法就是遵循这样的认识路线探索事物复杂性的研究方法。一般认为,综合集成方法的运用过程及其内容如下(于景元,周晓纪:26-32):

(1)定性的综合集成。综合集成方法是面向问题的,既可以是理论问题,也可以是应用问题。无论是哪类问题,对复杂系统或复杂巨系统能提出问题并形成经验型假设,通常不是一个专家或一个领域专家群体所能提出的,它需要不同学科不同领域专家构成的专家体系通过深入研究,反复研讨逐步形成共识。专家体系中的每个专家都有自己掌握的科学理论、经验知识,这些知识都是对客观世界规律的认识,都能从一个方面或一个角度去研究复杂系统或复杂巨系统问题。把这些专家们的科学理论、经验知识,以至

专家的智慧,通过结合、磨合和融合,从不同层次(自然的、社会的、人文的)、不同方面和不同角度去研究复杂系统或复杂巨系统的同一问题,就会获得全面认识。这个过程体现了不同学科不同领域知识的交叉研究,相互启发和激活,这是一种社会思维方式。系统本身就把多种学科知识用系统方法联系起来,统一在系统整体框架内,把原来切断了的知识之间再联系起来,明确系统结构、系统环境和系统功能。通过讨论,对所研究的问题形成定性判断,提出经验性假设。专家体系经过研讨所形成的问题和经验性假设与判断也可能不止一种,可能有几种,在这种情况下,就更需要精确论证。即使是一种共识,它仍然是经验性的,还不是科学结论,仍需要精确论证。

(2)定性定量相结合的综合集成。定性综合集成所形成的问题和提出的经验性假设与定性判断,已纳入到系统框架之内,为了用严谨的科学方式去证明或验证经验性判断的正确与否,我们需要把定性描述上升到系统整体的定量描述。这种定量描述可以用指标体系,包括描述性指标(如系统状态变量、观测变量、环境变量、控制变量),以及评价指标,其他的数量关系……等等。实现这一步的关键是定性定量相结合的综合集成。专家体系利用机器体系的丰富资源和它定量处理信息的强大能力,通过建模、仿真和实验等方式来完成这一步。

用模型和模型体系来描述系统是系统定量研究的有效方式。这种方式在自然科学、系统科学中被广泛使用。在系统科学中,对简单系统、简单巨系统等的研究,几乎完全是基于数学模型的,但对复杂系统,特别是复杂巨系统,期望完全靠数学模型来描述,当前还有很大困难,需要一方面发展新的数学理论,另一方面也需要新的建模方法。计算机技术、软件技术、知识工程、人工智能、算法等的发展,使基于规则的计算机建模得到了迅速发展。这类计算机模型所能描述的系统更广泛也更为逼真。在这方面,美国圣菲研究所(SFI)和国际应用系统分析研究所(IIASA)的一些工作是值得我们重视和借鉴的。把数学模型和计算机模型结合起来的系统模型尽可能地逼近实际系统,其逼近的程度取决于所要研究问题的精度要求。如果满足了所研究问题的精度要求,那么这个系统模型是可以信赖的,就可以应用这个模型来研究我们想要研究的问题。不同的系统,其模型精度要求是不一样的,例如人口系统的模型精度要求在千分之一左右,经济系统是百分之三左右。

复杂系统,特别是复杂巨系统的建模,既需要理论方法又需要经验知识,还需要真实的统计数据和有关信息资料。同时还要紧密结合系统实际,和基于对系统的真实理解。建模过程是个科学与经验相结合的过程。

在机器体系支持下,根据数据和信息体系、指标体系、模型体系和具体

方法体系，专家们对定性综合集成提出的经验性假设与判断进行系统仿真与实验。从系统环境、系统结构和系统功能之间的输入-输出关系，进行系统分析与综合。这就相当于用系统实验来证明和验证经验性假设与判断的正确与否。不过这个系统实验不是系统实体实验，而是在计算机上进行的仿真实验。这样的仿真实验有时比实体实验更有优越性，例如系统未来看发展趋势预测，对系统实体来讲，是不能预测的，因为它还没有运动到那个时刻，但在计算机仿真实验中却是可以做到的。

通过系统仿真与实验，对经验性假设与判断给出整体的定量描述，如用评价指标体系等，这就增加了新的信息，而且是定量的信息。这个过程可能要反复多次，以便把专家的经验，他们所能想到的各种因素都能反映到系统仿真和实验之中，从而观测到可能的定量结果，增强对问题的定量认识。

(3)从定性到定量的综合集成。定性综合集成形成对问题的经验性假设与判断的定性描述，经过定性定量相结合综合集成获得定量描述。经专家体系再一次综合集成，在这再一次综合集成中，由于有了新的定量信息，经过研讨专家们有可能从定量描述中获得证明或验证经验性假设和判断正确的定量结论，如果是这样，也就完成了从定性到定量综合集成。

但这个过程通常不是一次能完成的，往往要反复多次。如果定量描述还不足以支持证明和验证经验性假设和判断的正确性，专家们会提出新的修正意见和实验方案，再重复以上过程。这时专家们的经验、知识和智慧已融进到新的建议和方案之中。通过人机交互，反复比较，逐次逼近，直到专家们能从定量描述中证明和验证了经验性假设和判断的正确性，获得了满意的定量结论，这个过程也就结束了。这时的结论已从定性上升到定量，不再是经验性假设和判断，而是经过严谨论证的科学结论，这个结论就是现阶段我们对客观事物的科学认识。如果定量描述否定了原来的经验性假设和判断，那也是一种新的认识，又会提出新的经验性假设和判断，再重复上述过程。

综上所述，从定性综合集成提出经验性假设和判断的定性描述，到定性定量相结合综合集成得到定量描述，再到从定性到定量综合集成获得定量的科学结论，这就实现了从经验性的定性认识上升到科学的定量认识。这一过程可用图表示(见图4.7)。

正如钱学森(2001)所指出的那样，“当你定量解决了很多很多问题，譬如说关于国民经济中的许多问题以后，你有一个概括的提高的认识了，这又是从定量上升到定性了。自然，这个定性应该是更高层次的定性认识了。因此定性和定量的关系，是认识过程的一个描述，循环往复，永远如此。”基于新的定性认识又会提出新的经验性假设和判断，再应用综合集成方法又

会获得新的定量认识,这个过程永远不会完结,使我们对客观事物的认识越来越深刻,知识也越来越丰富。

从计算机科学角度来看,我们所要处理的复杂系统或复杂巨系统问题,都是非结构化问题,但目前计算机只能处理结构化问题。从上述综合集成过程来看,虽然每循环一次都是结构化处理,但其中已融进了专家体系的科学理论、经验知识和智慧,如调整模型、修正参数等。实际上,综合集成过程,我们是用了一个结构化序列去逼近一个非结构化问题,逼近到专家们都认为可信和满意为止,这也体现了以人为主,而不是靠机器体系去判断,当然机器体系可以协助专家体系去判断(于景元,周晓纪,2005:7)。

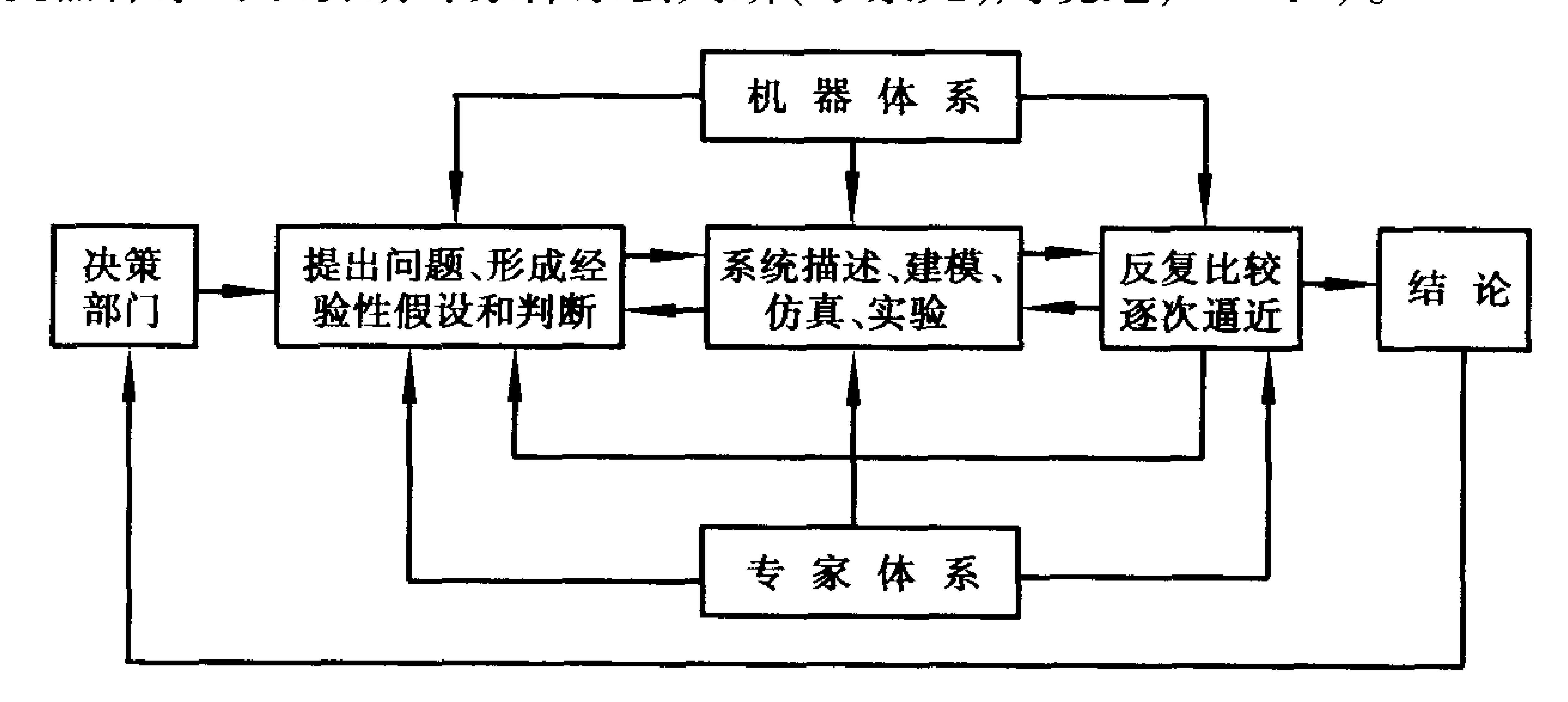


图 4.7 综合集成方法的运用过程

还应强调一点,应用这个方法需要有数据和信息体系支持,这就为复杂系统或复杂巨系统的统计指标设计和系统观测方式,提出了新的要求。以社会系统为例,有些社会系统问题用这个方法处理起来困难,往往不是方法的问题,而是缺少统计数据支持,机器体系也不会有这部分资源。我国的统计指标,只有经济方面的统计指标比较多,其他方面的统计指标很少,有些还没有统计指标,更没有统计数据。因此,综合集成方法的成功应用,必然要求具有较为完善的数据库资料。

三、综合集成方法的特点

归纳起来,综合集成方法具有以下特点(王寿云,于景元,戴汝为,1996:58-59):

(1)把定性研究和定量研究有机结合起来,并贯穿全过程,从多方面的定性认识,上升到定量认识。

(2)能把不同层次的知识(科学理论和经验知识)综合集成起来。

(3)能把各个学科结合起来进行研究,把多种领域的科学知识进行综合集成,取得一加一大于二的效果,而不是一加一等于二的“拼盘”。

(4)根据复杂巨系统的层次结构,把宏观研究和微观研究统一起来。

(5)应用这个方法必须有计算机系统的支持,这个计算机系统不仅具有管理信息系统和决策支持系统的功能,更重要的是具有知识的综合集成功能,这就要求充分利用人工智能、信息技术等高新技术。

(6)这个方法的应用,需要复杂巨系统的观测和统计数据,从指标体系的建立到基础数据的采集、存储、传输都是必要的和基本的信息基础。

(7)这个方法要求专家按群体方式工作,改变了传统科学研究中的个体工作方式。

(8)从思维科学角度看,这个方法体现了辩证思维和社会思维。

通过上述特点,我们从中可以看出,钱学森的这个综合集成方法保持和发扬了自然科学定量研究方法论的长处,又弥补了社会科学研究中定量研究的不足,从而使社会科学从描述科学逐步走向定量科学。

综合集成方法不是否认还原论方法,它还要吸收还原论方法的某些长处。应用这个方法时,也要求系统分解,但这是在系统总体指导下的分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到系统整体,实现一加一大于二的飞跃。所以它适用于多层次问题的研究,这就弥补了还原论的不足。

这个方法也不同于一般系统论的方法。一般系统论的方法强调系统整体当然是正确的,但流于泛谈,轻易就上升到哲学高度,而没有分解式的实证分析。而综合集成方法则是按一定的科学方式和程序进行操作,并从整体上解决问题。综合集成方法是吸收了整体论和还原论的优点而形成的方法论,是还原论方法和整体论方法的结合。

这个方法在哲学上也符合马克思主义认识论,是现代科学技术条件下实践论的具体化。从认识论的角度看,这种人—机结合方式所构成的人类认识系统,比起单纯靠人或机器都具有更强的整体优势、综合优势和智能优势。因而提高和加强了认识和处理复杂事物的能力。作为方法论,它具有分析和综合的统一,微观和宏观的统一,定性和定量的统一,整体论和还原论的统一,整体论和重点论的统一。

以钱学森为代表的中国复杂性研究者走了一条与西方研究者不同的道路。西方研究者(如SFI、普里高津)对复杂性的研究是从下而上的路线,即由简单系统、大系统和简单巨系统等的研究而上升到复杂巨系统的研究,是从微观到宏观;而中国学者则走了自上而下的路线,即首先研究开放的复杂巨系统,找到处理这种复杂巨系统的方法论。然后以此为主干,在各种不同

的条件下，分支出简单系统、大系统和简单巨系统及其处理方法，也就是从开放的复杂巨系统来研究复杂性，即从宏观到微观。钱学森的这一研究纲领，为复杂性科学构筑了清晰的结构和思路。他的这些探索在理论上是有深远意义的。钱学森之所以能这样高屋建瓴地提出这样一个不同于西方的研究纲领，是因为他既深谙西方科学精神和科学哲学的精髓，又吸收中华民族古代哲学的营养，因此能够把还原论与整体论结合起来，并运用辩证唯物主义，创造性地提出综合集成方法论。

四、综合集成方法在复杂性科学中的意义

综合集成方法指出了解决复杂巨系统和复杂性问题的过程性以及过程的方向性和反复性。这个过程是从提出问题和形成经验性假设开始。这一步是专家体系所具有的有关科学理论、经验知识和专家判断力、智慧相结合并通过讨论班的研讨方式而形成的，通常是定性的。这样的经验性假设（猜想、判断、方案、思路等）之所以是经验性的，是因为还没有经过精密的严格论证，并不是科学结论。从思维科学角度来看，这一步是以形象思维和社会思维为主。在研讨过程中，要充分发扬学术民主，畅所欲言，相互启发，大胆争论，把专家的创造性充分激发出来。精密的严格论证是通过人—机结合、人—机交互、反复对比、逐次逼近，对经验性假设作出明确结论，如果肯定了经验性假设是对的，这样的结论就是现阶段对客观事物认识的科学结论。如果经验性假设被否定，就需要对经验性假设进行修正，提出新的经验性假设，再重复上述过程。从思维科学角度来说，这一过程是以逻辑思维和辩证思维为主。在这个过程中，要充分应用数学科学、系统科学、控制科学、人工智能、以计算机为主的各种信息技术所提供的各种有效方法和手段，如系统建模、仿真、分析、优化等。近十多年来，这方面有许多新的发展。以系统建模为例，过去较多用的是数学建模，现在计算机建模越来越受到重视。以规则为基础的计算机建模，能描述的系统更加广泛，如圣菲研究所发展的 swarm 就是这样的软件平台。

从一般科学方法论角度来看，集成方法对复杂系统或复杂巨系统的研究，其基本意义主要体现在以下几个方面（于景元，周晓纪，2002：26-32）：

（1）为探索复杂系统指出了研究路线。集成方法采用了从上而下和由下而上的路线，从整体到部分再由部分到整体，把宏观和微观研究统一起来，最终从整体上研究和解决问题。例如，在研究大型复杂课题时，从总体出发，可将课题分解成几个子课题，在对每个子课题研究的基础上，再综合集成到整体。这是很重要的一步，并不是简单地将每个子课题的研究结论

拼凑起来，这样的“拼盘”，是不会拼出新思想、新结果的，也回答不了整体问题。这也是综合集成与一般分析综合方法的实质区别。

（2）为研究复杂系统提供了技术路线。采用人—机结合，实现以人为主的信息、知识和智慧的综合集成，这是综合集成方法采用的技术路线。这种技术路线是以思维科学为基础的。思维科学的研究表明，人脑和计算机都能有效处理信息，但两者有极大差别。从信息处理角度来看，人脑思维一种是逻辑思维（抽象思维），它是定量、微观处理信息的方法；另一种是形象思维，它是定性、宏观处理信息的方法，而人的创造性主要来自创造思维，创造思维是逻辑思维和形象思维的结合，也是定性和定量相结合，宏观与微观相结合，这是人脑创造性的源泉。今天的计算机在逻辑思维方面甚至比人脑做得更好更快，并善于信息的精确处理；但在形象思维方面，现在的计算机还不能给我们以任何帮助，至于创造性思维只能靠人脑。从这个角度来看，期望完全靠机器来解决复杂性问题，至少当前是行不通的。然而计算机毕竟在逻辑思维方面有其优势，如果把人脑和机器结合起来，以人为主，就更有优势，人将变得更加聪明。人和计算机各有所长、相辅相成和谐地工作，在一起形成“人帮机，机帮人”的合作方式。这种人—机结合的思维方式和研究方式就具有更强的创造性和认识客观事物的能力。

（3）实现信息、知识和智慧的综合集成。通过人—机结合、人—网结合、以人为主，实现信息、知识和智慧的综合集成。这也是综合集成方法的重要功能之一。信息、知识和智慧这是三个不同层次的问题。有了信息未必有知识，有了信息和知识未必就有智慧。信息的综合集成可以获得知识，信息和知识的综合集成可以获得智慧。人类有史以来，是通过人脑获得知识和智慧的。现在由于计算机科学与技术的发展，我们可以通过人—机结合、人—网结合的方式来获得知识和智慧，在人类发展史上，这是具有重大意义的进步。

五、综合集成方法的应用案例

钱学森认为，要建立开放的复杂巨系统的一般理论，必须从一个一个的开放的复杂巨系统入手，只有这些研究成果多了，才能从中提炼出开放的复杂巨系统的一般理论。当年他建立工程控制论就是走的这个路子。他认为，在开放的复杂巨系统中，实践经验和资料积累最丰富的是社会系统和人体系统。社会科学对社会问题的研究，已经有了悠久的历史，取得了丰硕的成果，如把社会科学、系统科学、自然科学、数学科学等结合起来，采用综合集成方法进行研究，就会取得新的进展，开辟出新的前景。因此，钱学森重点解剖了社会系统（钱学森，2001：137-152），以于景元、戴汝为（1996）等为

代表的钱学森系统学讨论班的成员们则对人—机智能系统、信息工程系统、地理系统、国防系统等他们认为的典型巨系统进行了深入的研究，并取得了丰硕的成果。

钱学森根据社会形态的概念，从整体上研究社会主义建设的组织管理问题，提出了社会主义的体系结构。社会形态这个概念是马克思首先提出来的。尽管社会系统很复杂，但如果把社会形态和社会系统结构结合起来，"从宏观角度看，这样复杂的社会系统，其形态，即社会形态，最基本的侧面有三个，这就是经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态"。社会形态的这三个侧面是相互联系相互影响相互作用的，从而构成一个社会的有机整体，形成了社会系统结构。钱学森正是从这里出发，对社会这个巨系统进行了全面的剖析。他基于社会形态对社会系统的研究，还对社会系统工程、决策科学化、民主化和组织管理现代化提出了自己的看法，并建议国家设立国家管理的总体设计部。他还由此对产业革命、技术革命和科学革命之间的关系进行了系统的研究。他在对社会巨系统进行实际研究的同时，也进行了理论概括。例如，他曾指出，开放的复杂巨系统的整体行为描述，要用系统状态(system state)这个概念，如有奇异吸引子，即为系统态。微观混沌(无序)是宏观有序的基础。

为解决宏观经济决策问题，在马宾等经济学家和航天部710所于景元等的联合研究中，由几百个变量和上千个参数描述的、定性和定量相结合系统工程技术的应用研究，取得了成果，初步证明钱学森综合集成的可行性。之后，于景元、戴汝为等受中央有关部委的委托，联合进行了宏观经济智能决策支持系统的研究和开发，完成并达到了系统设计要求。实际运行表明，这个系统开发是成功的，受到了有关方面的肯定，已成为综合集成方法应用和探索的成功范例。实践证明，开放的复杂巨系统是客观存在的，综合集成法也是可行的。

综合集成方法已经在各个领域有了比较成功的案例，已经成为一种比较成熟的处理复杂系统特别是复杂巨系统的有效方法，在这里我们就不再详细列举。当然，综合集成方法从提出到现在也不过十多年的时间，方法本身及其应用，虽然取得了一些进展，但从长远来看，这些进展仅仅是个开始。方法论的创新，将孕育新的科学革命。培根式的还原论方法，推动了19世纪到20世纪科学的大发展。钱学森深谙西方科学哲学的精髓，又吸取中华民族古代哲学的营养，使他能把还原论方法和整体论方法结合起来，并运用辩证唯物主义，创立了系统论方法——综合集成方法，它必将推动21世纪系统科学的大发展。

结　语

任重更道远

复杂性和复杂系统的精确界定目前还有一定的困难，但无论如何界定，复杂性科学的兴起都对传统科学产生了重大的影响。首先，复杂性科学的兴起极大地拓展了科学研究的疆域，使科学从线性的、确定的、有序的传统领域扩展到非线性、不确定和无序的领域。传统科学在对自然界及其规律获得科学认识的同时，也给自己划了一块难于跨越的界限，并把自己封闭起来。随着复杂性科学的兴起，原来认为不是科学的领域，或者科学难于企及的领域也逐渐纳入了科学研究的范围，科学的目标也从原来的追求简单性走向了现在的认识复杂性。如果把科学研究的领域比作海洋，那么复杂性科学的兴起让我们认识到，传统的简单性科学只是科学海洋中的一个个孤岛而已，围绕着这些孤岛是无边无际的复杂性大海。所以，复杂性科学的兴起是科学发展的大事，难怪会被人称为"21 世纪的科学"。

复杂性科学的兴起也对传统科学的思维方式产生了重要的影响。传统科学的思维方式是建立在"有序"、"分割"和"理性"三大支柱上。随着复杂性科学的兴起，这些支柱的基石一个个都被动摇。然而，复杂性思维方式决不是要排除确定性以便建立不确定性，排除分割以便建立不可分割性，排除逻辑以便允许对逻辑规则的任何违反。相反，它的做法是不断地往返穿梭于确定性和不确定性之间、要素和整体之间、可分割和不可分割之间。同样地，我们使用经典逻辑，它的同一律、非矛盾律，演绎法和归纳法，但是我们知道它们效用的极限，我们知道在某些情况下必须违反它们。因此，我们在复杂性科学研究中，不是要抛弃传统科学的有序、分割和逻辑等方法论原则，而是要把它们整合到一个更加广泛和更加丰富的框架内。我们也不是要用空洞的整体主义来反对刻板的还原主义，而是要把系统的整体性和局

部的具体性联系起来,把整体论和还原论有机地结合起来。我们应该应用有序和无序、分割和结合、自主和依赖的连接原则,使它们在宇宙内部处于互补、竞争和对抗的两重性逻辑的关系中。复杂性思维方式并不是简化思维方式的对立面,而是要整合后者,并形成新的融贯的思维方式,形成新的融贯方法论。

从古代朴素的整体论到近代还原论的兴起,是科学方法论的重大进步。因此,还原论虽然在科学实践中表现出种种不如意,但它的历史功绩,以及它在科学研究中的作用是不容否定的,更不可彻底被抹杀。当然,由于还原论的成功,把它当作唯一的科学方法也是片面的,这样做就把还原论的功用无限夸大,没有考虑它的适用范围或限度。当科学发展到一定的时期,对还原论的批判也是一种必然。但是,对还原论的批判并不意味着完全回归到整体论中。整体论有它的优势,也必然有它的劣势。面对复杂系统,仅仅依靠还原分析是无能为力的,但单独使用整体或整合方法也同样是力不能及的。这就需要将两者联合起来,发扬优势,克服劣势,形成上下融合、优势互补的新方法论:融贯论。用黑格尔哲学的话来说,如果还原论的兴起是对古代整体论的否定的话,那么融贯论的兴起就是对还原论的否定,也是对整体论的否定之否定,也就是说科学方法论走过了"正—反—合"这样一条否定之否定的辩证发展过程,这样也就吸取了从古到今所有科学方法论的精华,为认识和研究复杂性和复杂系统铺平了方法论的道路。

方法论(methodology)和方法(methods)既相互联系,也相互区别。它们属于两个不同层次的问题。科学方法论属于哲学层次和范畴,它是关于研究客观事物所应遵循的途径和路线,按照这个途径研究下去,能使我们达到对所研究问题的科学认识。在方法论指导下实现上述途径和路线是具体方法问题,而且方法也不止一种,可能有多种方法,以至形成方法体系。如果方法论不对,具体方法再好,也解决不了根本问题。当然,再好的方法论没有具体方法的支撑,这个方法论也解决不了什么问题,两者是相辅相成的。在提出复杂性科学的新方法论,即融贯论的基础上,我们又提出了复杂性科学的具体研究方法。通过对复杂性科学的原始文献的归纳,本论文总结出六种复杂性科学研究的具体方法:隐喻、模型、数值、计算、虚拟和集成。这六种方法也是既相互联系又相互区别,作为形象思维的隐喻是对复杂系统探索的起点和基础。复杂系统由于其复杂性,企望一下子就得到精确的数学模型是不太可能的,否则就不是复杂系统了。我们只能通过隐喻的方法从整体上来把握复杂系统。通过隐喻类比,建立起复杂系统的科学模型,当然这里的模型也是扩大了范围的模型,也就是既有定性模型也有定量模型,

甚至包括描述性的模型，但是无论如何，它比隐喻都上升了一步。在模型的基础上，我们可以对复杂系统做数值计算、算法描述，并通过计算机在虚拟现实的世界里进行实验验证，最后把通过上述各种方法得到的对复杂系统的认识综合集成起来，形成一个比较完整的认识。所以，我们总结的六种复杂性科学研究方法就有相对的独立性，也有它们的联系性。它们结合起来，就形成一个比较完整的复杂性科学研究的方法体系。这些方法的实现都体现了融贯论这一新的科学方法论的原则，也就是说，融贯论通过这些具体的科学方法得到贯彻和张扬。

复杂性科学无论是从 1928 年贝塔朗菲提出一般系统论思想算起，还是从 1984 年美国圣菲研究所的成立算起，其历史都可以说是十分短暂的。特别是与从文艺复兴开始的有着数百年历史的近现代科学相比，复杂性科学就显得更像一个刚刚出生的婴儿，其啼哭声还没有停止。近现代科学在数百年的发展中科学家们前仆后继，曾经产生过伽利略、牛顿、爱因斯坦等无数大师级的风流人物；哲学家们围绕着各种科学现象和科学思想进行过无数的讨论和交锋，曾经产生过不可胜数的哲学大家。与此相比，刚刚兴起的复杂性科学就显得十分稚弱。在仅有的数十年的发展中，目前既还没有产生过牛顿式的复杂性科学家，也还没有产生过笛卡儿、康德之类的哲学家。复杂性科学研究如何展开？它的研究纲领究竟如何？现在都还在摸索之中，目前都还没有任何结论。我们也期待着复杂性科学领域的牛顿、爱因斯坦的早日出现，只有那时复杂性科学才能真正占有属于自己的历史舞台。

在近现代科学的发展的早期，曾经有培根这样的哲学家呼唤着科学家们要采用归纳法，但当时的科学家们没有太理会这位自己并不从事科学研究的哲人。只有在科学发展了一两百年后，产生了牛顿等科学大师，才由既是科学家又是哲学家的笛卡儿总结出近现代科学的研究方法和方法论：还原方法和还原论，并在以后的科学实践中自觉或不自觉地反复运用。复杂性科学要发展到近现代还原论科学这样的成熟程度还需要很长的历程。因此，要归纳总结出其方法和方法论，目前的确还十分困难。也许还需要耐心等待一段漫长的时间，现在我们只能做一些初步的探讨。如果说复杂性科学还在等待它的牛顿，那么复杂性哲学也还在等待它的笛卡儿。从国内外复杂性哲学的研究状况来看，复杂性哲学的笛卡儿的出现还要漫长的等待。

参考文献

中文部分

1. 艾根,舒斯特尔. 超循环论. 曾国屏,沈小峰译. 上海:译文出版社,1990
2. 巴菲立普著. 社会科学中的整体论思想. 吴忠等译. 银川:宁夏人民出版社,1988
3. 巴克. 大自然如何工作. 李炜等译. 武汉:华中师范大学出版社,2001
4. 贝塔朗菲. 普通系统论的历史和现状. 见:科学译文集. 北京:科学出版社,1980:308-412
5. 贝塔朗菲. 人的系统观. 张志伟译. 北京:华夏出版社,1989
6. 朗菲. 生命问题. 吴晓江译. 北京:商务印书馆,1999
7. 朗菲. 一般系统论. 林康义,魏宏森等译. 北京:清华大学出版社,1987
8. 贝塔朗菲. 一般系统论. 秋同,袁嘉新译. 北京:社会科学文献出版社,1987
9. 波索马特尔,格林. 沙地上的图案——计算机、复杂和生命. 陈禹等译. 南昌:江西教育出版社,1999
10. 布查纳. 临界. 刘杨等译. 长春:吉林人民出版社,2001
11. 布里格斯,皮特. 混沌七鉴——来自易学的永恒智慧. 陈忠,金纬译. 上海:上海科技教育出版社,2000
12. 布里格斯,皮特. 湍鉴——混沌理论与整体性科学导引. 刘华杰等译. 北京:商务印书馆,1998
13. 陈天机等. 系统视野与宇宙人生. 桂林:广西师范大学出版社,2004
14. 陈一壮. 埃德加·莫兰的"复杂方法"思想及其在教育领域内的体现. 教育科学. 2004(2):1-5

15. 陈一壮. 包纳简单性方法的复杂性方法. 哲学研究. 2004(8):64-70
16. 陈一壮. 超越系统观的复杂性观. 江南大学学报,人文社会科学版. 2004(5):16-21
17. 陈忠. 复杂性的探索. 合肥:安徽教育出版社,2002
18. 成思危. 复杂性科学探索. 北京:民主与法制出版社,1999
19. 戴汝为. 复杂巨系统科学——一门21世纪的科学. 自然杂志. 1997(19),(4):187-192
20. 戴维森. 隐匿中的奇才——路德维希·冯·贝塔朗菲传. 陈蓉霞译. 上海:东方出版中心,1999
21. 邓少平. 算法与生命. 科学. 1996(10):6-8
22. 迪亚库等. 天遇——混沌与稳定性的起源. 王兰宇译. 上海:上海科技教育出版社,2001
23. 笛卡尔. 谈谈方法. 王太庆译. 北京:商务印书馆,2000
24. 董春雨,姜璐. 层次性:系统思想与方法的精髓. 系统辩证学学报. 2001(1):1-4
25. 董晋骞. 整体论的科学性问题初探. 社会科学辑刊. 2000(5):17-20
26. 董立河. 试论还原论与整体论的互补与共存. 太原师范学院学报,人文科学版. 2002(1):42-45
27. 堵丁柱,葛可一,王洁. 计算复杂性导论. 北京:高等教育出版社,2002
28. 段培君. 方法论个体主义与分析传统. 自然辩证法通讯. 2002(6):7-13
29. 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971
30. 恩斯特·卡西尔. 语言与神话. 于晓等译. 北京:三联书店,1988
31. 方锦清. 令人关注的复杂性科学和复杂性研究. 自然杂志. 2002(24)(1):8-10
32. 费多益. 分形学:整体论的扩展. 科学技术与辩证法. 2000(6):17-21
33. 冯长根等. 非线性科学的理论、方法和应用. 北京:科学出版社,1997
34. 冯国瑞. 从定性到定量综合集成方法与唯物辩证法. 西安交通大学学报. 社会科学版,2004(4):58-66
35. 冯国瑞. 开放复杂巨系统研究的哲学思考. 软科学研究. 1997(7):89-93
36. 盖尔曼. 夸克与美洲豹:简单性和复杂性的奇遇. 杨建邺,李香莲译. 长沙:湖南科技出版社,2001
37. 高安秀树. 分数维. 沈步明,常子文译. 北京:地震出版社,1989
38. 格拉斯等. 从摆钟到混沌——生命的节律. 潘涛等译. 上海:上海远东出版社,1994

39. 格雷席克. 混沌及其秩序——走近复杂体系. 上海:百家出版社,2001
40. 格里博格,约克等. 混沌——对科学和社会的冲击. 刘式达等译. 长沙:湖南科技出版社,2001
41. 郭贵春,安军. 隐喻的语境分析. 江海学刊. 2002(5):36-43
42. 郭贵春. 隐喻与科学理论的陈述. 社会科学研究. 2003(4):1-6
43. 郭贵春. 科学隐喻的方法论意义. 中国社会科学. 2004(2):92-101
44. 郭垒. 还原论、自组织理论与计算主义. 自然辩证法研究. 2003(12):83-87
45. 郭元林,金吾伦. 复杂性是什么. 科学技术与辩证法. 2003(6):22-28
46. 郭元林. 复杂性科学知识论. 中国社会科学院博士论文,2003
47. 哈肯. 大脑工作原理——脑活动、行为和认知的协同学研究. 郭治安,吕翎译. 上海:上海科技教育出版社,2000
48. 哈肯. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社,1989
49. 哈肯. 协同学——大自然构成的奥秘. 凌复华译. 上海:上海译文出版社,1995
50. 哈肯. 协同学——自然成功的奥秘. 戴鸣钟译. 上海:上海科学普及出版社,1988
51. 哈肯. 协同学引论. 徐锡申等译. 北京:原子能出版社,1984
52. 哈肯. 信息与自组织. 宁存政,郭治安等译. 成都:四川教育出版社,1988
53. 海姆. 从界面到网络空间——虚拟实在的形而上学. 金吾伦,刘钢译. 上海:上海科技教育出版社,2000
54. 郝柏林. 复杂性的刻画和"复杂性科学". 自然杂志. 1999(3):3-8
55. 郝宁湘. 计算:一个新的哲学范畴. 哲学动态. 2000(11):32-36
56. 郝宁湘. 计算复杂性理论及其哲学问题. 自然辩证法研究. 1995(3):20-24
57. 黑格尔. 逻辑学(上卷). 杨一之译. 北京:商务印书馆,1977
58. 怀特海. 科学与近代世界. 何钦译. 北京:商务印书馆,1991
59. 霍根. 科学的终结. 孙雍君等译. 呼和浩特:远方出版社,1997
60. 霍金. 霍金讲演录. 杜欣欣,吴忠超译. 长沙:湖南科技出版社,1996
61. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性. 周晓牧,韩晖译. 上海:上海科技教育出版社,2000
62. 霍兰. 涌现—从混沌到有序. 陈禹等译. 上海:上海科学技术出版社,2001
63. 金吾伦. 生成哲学. 保定:河北大学出版社,2000
64. 卡普拉. 转折点. 冯禹等译. 北京:中国人民大学出版社,1989
65. 卡斯蒂. 虚实世界. 王千祥,权利宁译. 上海:上海科技教育出版社,1998
66. 考夫曼. 宇宙为家. 李绍明等译. 长沙:湖南科学技术出版社,2003

67. 克拉默. 混沌与秩序——生物系统的复杂结构. 柯志阳，吴彤译. 上海：上海科技教育出版社，2000
68. 库恩. 科学革命的结构. 金吾伦等译. 北京：北京大学出版社，2004
69. 蒯因. 从逻辑的观点看. 江天骥译. 上海：上海译文出版社，1987
70. 拉波波特. 一般系统论——基本概念和应用. 钱兆华译，闵家胤校. 福州：福建人民出版社，1993
71. 拉兹洛. 进化——广义综合理论. 闵家胤译. 北京：社会科学文献出版社，1988
72. 拉兹洛. 用系统论的观点看世界. 闵家胤译. 北京：中国社会科学出版社，1985
73. 拉兹洛. 与真理为友. 上海：上海科技教育出版社，2002
74. 李建会. 从计算的观点看. 哲学研究. 2004(3)：66-71
75. 李建会. 人工生命——探索新的生命形式. 自然辩证法研究. 2001(7)：1-5
76. 李建会. 生命与计算：人工生命的生命观研究. 北京大学博士论文，2002
77. 李明，威塔涅. 描述复杂性. 李明译. 北京：科学出版社，1998
78. 李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学. [华中师范大学博士论文]，2001
79. 李习彬，汤敏轩. 整体论的局限与总体论的突破：政府管理思维的范式革新. 湖南师范大学社会科学学报. 2004(4)：50-54
80. 李夏，戴汝为. 突现(emergence)——系统研究的新观念. 控制与决策. 1999(2)：97-102
81. 李夏，戴汝为. 系统科学与复杂性(1). 自动化学报. 1998(2)：200-207
82. 李夏，戴汝为. 系统科学与复杂性(2). 自动化学报. 1998(4)：476-483
83. 李醒民. 隐喻：科学概念变革的助产士. 自然辩证法通讯. 2004(1)：22-28
84. 李耀东，崔霞，戴汝为. 综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现. 复杂系统与复杂性科学. 2004(1)，(1)：27-32
85. 利科. 活的隐喻. 汪家堂译. 上海：上海译文出版社，2004
86. 梁美灵，王则柯. 童心与发现——混沌与均衡纵横谈. 北京：三联书店，1996
87. 林定夷. 科学逻辑与科学方法论. 成都：电子科技大学出版社，2003
88. 林夏水等. 分形的哲学漫步. 北京：首都师范大学出版社，1999
89. 刘闯. 一个几何学隐喻：关于统一科学的可能性. 自然辩证法通讯. 2003(1)：25-30
90. 刘放桐. 超越近代哲学的视野. 江苏社会科学. 2000(6)：8-12
91. 刘华杰. 浑沌语义学与哲学. 长沙：湖南教育出版社，1998

92. 刘劲杨. 哲学视野中的复杂性. 中国人民大学博士论文,2004
93. 陆同兴. 非线性物理概论. 合肥:中国科学技术大学出版社,2002
94. 吕埃勒. 机遇与混沌. 刘式达等译. 上海:上海科技教育出版社,2001
95. 洛伦兹. 混沌的本质. 刘式达等译. 北京:气象出版社,1997
96. 马红霞,钱兆华. 20 世纪系统思想发展的回顾. 系统辩证学学报. 2003(1):56-61
97. 迈克马斯特. 智能优势:组织的复杂性. 王浣尘等译. 成都:四川人民出版社,2000
98. 迈因策尔. 复杂性中的思维. 曾国屏译. 北京:中央编译出版社,1999
99. 麦克格拉斯. 科学与宗教引论. 王毅译. 上海:上海人民出版社,2000
100. 曼德布罗特. 大自然的分形几何学. 陈守吉,凌复华译. 上海远东出版社,1998
101. 孟建伟. 还原论与整体论:必要的张力. 哲学研究. 1997(8):32-38
102. 苗东升,刘华杰. 混沌学纵横谈. 北京:中国人民大学出版社,1996
103. 苗东升. 把复杂性当作复杂性来处理. 科学技术与辩证法. 1996(1):11-15
104. 苗东升. 分形与复杂性. 系统辩证学学报. 2003(2):1-7
105. 苗东升. 复杂性科学与后现代主义. 民主与科学. 2003(3):29-32
106. 苗东升. 复杂性研究的现状与展望. 系统辩证学学报. 2001(4):3-9
107. 苗东升. 开放的复杂巨系统理论:科学性、研究现状和存在问题. 河北师范大学学报,哲社版. 2005(2):18-24
108. 苗东升. 论复杂性. 自然辩证法通讯. 2000(6):87-92
109. 苗东升. 论系统思维(二):从整体上认识和解决问题. 系统辩证学报. 2004(4):1-6
110. 苗东升. 论系统思维(三):整体思维与还原思维相结合. 系统辩证学报. 2005(1):1-5
111. 苗东升. 论系统思维(一):把对象作为系统来识物想事. 系统辩证学报. 2004(3):1-7
112. 苗东升. 系统思维与复杂性研究. 系统辩证学报. 2004(1):1-5
113. 苗东升. 综合集成法的认识论基础. 系统辩证学报. 2003(1):37-42
114. 闵家胤. "复杂性研究"和"复杂性科学". 哲学动态. 2003(3):10-11
115. 莫兰. 方法:思想观念. 秦海鹰译. 北京:北京大学出版社,2002
116. 莫兰. 方法:天然之天性. 吴泓缈等译. 北京:北京大学出版社,2002
117. 莫兰. 复杂的思想:自觉的科学. 陈一壮译. 北京:北京大学出版社,2001

118. 莫兰. 迷失的范式:人性研究. 陈一壮译. 北京:北京大学出版社,1999
119. 内格尔. 科学的结构. 徐向东译. 上海:上海译文出版社,2002
119. 尼姑拉斯布宁,于纪元. 西方哲学英汉对照词典. 于纪元等译. 北京:人民出版社,2001
120. 尼科利斯,普里戈金. 探索复杂性. 罗久里等译. 成都:四川教育出版社,1986
122. 牛顿. 探求万物之理——混沌、夸克与拉普拉斯妖. 李香莲译. 上海:上海科技教育出版社,2000
123. 欧阳莹之. 复杂系统理论基础. 田宝国等译. 上海科技教育出版社,2002
124. 彭新武. 复杂性科学:一场思维方式的变革. 河北学刊. 2003(3):39-43
125. 彭新武. 复杂性思维与社会发展. 北京:中国人民大学出版社,2003
126. 普里戈金,斯唐热. 从混沌到有序:人与自然的新对话. 曾庆宏,沈小峰译. 上海:上海译文出版社,1987
127. 普里戈金. 确定性的终结——时间、混沌与新自然法则. 湛敏译. 上海:上海科技教育出版社,1998
128. 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志. 1990(13),(1):3-10
129. 钱学森. 创建系统学. 太原:山西科学技术出版社,2001
130. 钱学森. 论系统工程(修订版). 长沙:湖南科学技术出版社,1988
131. 钱学森. 要从整体上考虑并解决问题. 人民日报. 1990-12-31(3)
132. 切克兰德. 系统论的思想与实践. 左小斯,史然译. 北京:华夏出版社,1990
133. 圣吉. 第五项修炼. 郭进隆译. 上海:三联书店,1999
134. 石钟慈. 第三种科学方法——计算机时代的科学计算. 北京:清华大学出版社,2000
135. 司马贺. 人工科学——复杂性面面观. 武夷山译. 上海:上海科技教育出版社,2004
136. 斯泰西. 组织中的复杂性与创造性. 宋学峰,曹庆仁译. 成都:四川人民出版社,2000
137. 斯图尔特. 上帝掷骰子吗?——混沌之数学. 潘涛译. 上海:上海远东出版社,1995
138. 孙慕天,采赫米斯特罗. 新整体论. 哈尔滨:黑龙江教育出版社,1996
139. 孙小礼. 科学方法中的十大关系. 上海:学林出版社,2004
140. 孙小礼. 自然辩证法通论(第二卷). 北京:高等教育出版社,1993

141. 孙孝科. 还原论及其历史发展. 南京邮电学院学报,社科版. 1999(2):22-27
142. 托姆. 突变论:思想和应用. 周仲良译. 上海:上海译文出版社,1989
143. 瓦托夫斯基. 科学思想的概念基础——科学哲学导论. 范岱年等译. 北京:求实出版社,1982
144. 王寿云,于景元等. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科技出版社,1996
145. 维纳. 控制论. 郝季仁译. 北京:科学出版社,1962
146. 魏宏森. 复杂性研究与系统思维方式. 系统辩证学学报. 2003(1):7-8
147. 魏宏森,宋永华等. 开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览. 成都:四川教育出版社,1991
148. 沃德罗普. 复杂:诞生于秩序和混沌边缘的科学. 陈玲译. 北京:三联书店,1997
149. 吴彤,黄欣荣. 复杂性:从三说起. 系统辩证学学报. 2005(1):6-11
150. 吴彤. "复杂性"研究的若干哲学问题. 自然辩证法研究. 2000(1):6-10
151. 吴彤. 复杂网络研究及其意义. 哲学研究. 2004(8):58-63
152. 吴彤. 复杂性、科学与后现代思潮. 内蒙古大学学报. 2003(3):8-12
153. 吴彤. 复杂性范式的兴起. 科学技术与辩证法. 2001(6):20-24
154. 吴彤. 复杂性概念研究及其意义. 中国人民大学学报. 2004(5):2-9
155. 吴彤. 复杂性研究中的若干问题和意义. 系统辩证学学报. 2002(4):1-5
156. 吴彤. 科学哲学视野中的客观复杂性. 系统辩证学学报. 2001(2):44-47
157. 吴彤. 略论认识论意义的复杂性. 哲学研究. 2002(5):58-63
158. 吴彤. 算法复杂性研究历史述评. 系统辩证学学报. 2004(1):24-29
159. 吴彤. 自组织方法论研究. 北京:清华大学出版社,2001
160. 西蒙. 人工科学. 武夷山译. 北京:商务印书馆,1987
161. 谢爱华. "突现论"中的哲学问题. 中国社会科学院博士论文,2000
162. 谢光辉. 汉字字源字典. 北京:北京大学出版社,2000
163. 谢惠民. 复杂性与动力系统. 上海:上海科技教育出版社,1994
164. 许国志. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000
165. 许国志. 系统科学与工程研究. 上海:上海科技教育出版社,2002
166. 亚里士多德. 诗学. 北京:商务印书馆. 1995
167. 颜泽贤等. 复杂系统演化论. 北京:人民出版社,1993
168. 于景元,涂元季. 从定性到定量综合集成方法——案例研究. 系统工程理论与实践. 2002(5):1-7
169. 于景元,周晓纪. 从定性到定量综合集成方法的实现和应用. 系统工程

理论与实践.2002(10):28-30
170. 于景元.从综合集成思想到综合集成实践.管理学报.2005(1):4-10
171. 于景元.综合集成方法与总体设计部.复杂系统与复杂性科学.2004(1):20-26
172. 于景元.钱学森的现代科学技术体系与综合集成方法论.中国工程科学.2001(11):10-18
173. 詹姆斯·格莱克.混沌:开创新科学.张淑誉译.上海:上海译文出版社,1990
174. 湛垦华,沈小峰等.普里戈金与耗散结构理论.西安:陕西科学技术出版社,1982
175. 张济忠.分形.北京:清华大学出版社,1995
176. 张世英.进入澄明之境——哲学的新方向.北京:商务印书馆,1999
177. 张世英.新哲学讲演录.桂林:广西师范大学出版社,2004
178. 赵光武.还原论与整体论相结合探索复杂性.北京大学学报,哲社版.2002(6):14-19
179. 赵光武.深入探索复杂性.系统辩证学学报.2001(4):1-2
180. 赵凯荣.复杂性哲学.北京:中国社会科学出版社,2001
181. 赵松年.非线性:它的内容、方法和意义.北京:科学出版社,1994
182. 郑春顺.混沌与和谐:现实世界的创造.马世元译.北京:商务印书馆,2002
183. 朱宝荣.计算机模拟的认知功能及其可能性.自然辩证法研究.2003(12):72-75
184. 朱凤青.蒯因整体论意义观分析.哈尔滨工业大学学报,社科版.2003(3):20-23
185. 朱志昌.当代西方系统运动.系统科学与工程研究.载许国志等.上海:上海科学技术教育出版社,2000:592

英文部分

1. Adleman, L. M. (1998), Computing with DNA, *Scientific American*, 279(2): 54-61.
2. Allen, Peter M. (2000), Knowledge, Ignorance, and Learning, Emergence, 2(4): 78-103.
3. Anderson, & N. E. Sahlin(1997), *The complexity of Creativity*, Kluwer Academic Publishers.

4. Andrew, M. (1989), *Self-Organizing Systems*, New York: Gordon and Breach Science Publishers.

5. Axelrod, R. & Cohen, M. D. (1999), *Harnessing complexity*. New York, Free Press.

6. Axelrod, R. M. (1997), *The Complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton: Princeton University Press.

7. Badii, R. and A. Politi (1997), *Complexity: Hierarchical structures and scaling in physics*, Cambridge University Press.

8. Bak, Per & Tang Chao, Kurt Wiesenfeld (1988), *Self-organized criticality*, Physical Review A, Vol. 38, No. 1, July1.

9. Bak, Per and Chen Kan (1991), *Self-organized criticality*, Scientific American, Jan, (264).

10. Bak, Per and K. Chen, and C. Tang (1990), Forest-fire Model, *Physical Review A*, 16, 297.

11. Bak, Per and Kim Sneppen, Bak-Sneppen (1993), Evolution Model, *Physics Review Letter*, 71, 4083.

12. Blackburn, Simon (1996), *Oxford Dictionary of Philosophy*, Oxford: Oxford University Press, p. 240.

13. Byrne, D. (1998), *Compleixty theory and the social sciences: an introduction*, New York: Routledge.

14. Cilliers, P. (1998), *Complexity and postmodernism*, New York: Routledge.

15. *Complexity Digest* (http://www.csu.edu.au/ci/)

16. *Complexity International* (Published by Wiley Periodicals, Inc., A Wiley Company Online ISSN: 1099-0526 Print ISSN: 1076-2787) (http://journals.wiley.com/complexity/)

17. *Complexity* (ISSN 1320-0682) (http://www.csu.edu.au/ci/)

18. *Computational complexity* (http://link.springer.de/link/service/journals/00037/)

19. Coveney, P. and Highfield, R. (1995), *Frontiers of Complexity: The Search for Order in a Chaotic World*. London: Ballantine Book.

20. Cowan G. A. & al. (1994), *Complexity: Metaphors, Models and Reality*. MA: Addison-Wesley.

21. Dent, E. B., Complexity Science: a Worldview Shift. Emergence, 1991(1)

22. *Emergence* (www.emeggence.com)

23. *ENTROPY*(www. mdpi. org/entropy)

24. Eriksson, K. E. & K. Lindgren, B. A. Mansson(1987), *Structure, context, complexity, organization: physical aspects of information and value*, Singapore: World Scientific.

25. Fuller, Ted and paul Moran(2000), Moving beyond Metaphor, *Emergence*, 2 (1), 50-71.

26. Holland, J. H. (1998), *Emergence: From Chaos to Order*, New York: Helix Books.

27. http://www. sciencemag. org/. science, April, 2, 1999

28. *Hypertext Bibliography of Measures of Complexity* (http://bruce. edmonds. name/combib/)

29. *Journal of Complexity*(http://www. academicpress. com/jcomp)

30. Kauffman, S. A. (1993), *The Origins of order, Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York.

31. Kauffman, S. A. (1995), *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*, London: Oxford University Press.

32. Kaye, B. H. ,分形漫步. 徐新阳等译. 沈阳:东北大学出版社,1994

33. King, Ian T. (2000), *Social Science and Complexity: The Scientific Foundations*, Huntington, New York: Nova Science Publishers, Inc..

34. Koperski (1998), Model, Confirmation, and Chaos, *Philosophy of Science*, 65 (December) pp. 624-648.

35. Lane D et al. (1995), *Foresight Complexity and Strategy*, Sante Fe Institute Working paper, 12-123.

36. Langton, C. G. (1986), "Studying Artificial Life with Cellular Automata", *Physica D*, (10): 120-149.

37. Langton, C. G. (1989), Artificial Life, *Artificial Life*. C. Langton, ed., SFI Studies in the Sciences of complexity, Proc. Vol. VI. Redwood City, CA: Addison-Wesley.

38. Langton, C. G. (1995) (ed.), *Artificial Life: An Overview.* Cambridge, MA: MIT Press.

39. Li T, and Yorke J. (1975), "Period three implies chaos", *Amer. Math. Monthly*, (82): 985-992.

40. Michael R. L. (1999), "*Complexity: the Science, its Vocabulary and its Relation to Organizations*", *Emergence.* 4, 1(1): 92-110.

41. Morçöl, Gökuğ (2001), "*What is Complexity Science? Postmodernist or Post-positivist?*" *Emergence*, 3(1), 104-119.
42. Nadel, Lynn and Stein Daniel L. (1995), ed., 1993 *Lectures in Complex Systems*, Lectures Vol., VI, SFI Studies in the Sciences of Complexity, New York: Addison-Wesley.
43. Peterson, M., (1996), *Complexity and Evolution*, Cambridge: Cambridge University Press.
44. Raimundo J. Franco Parellada (2002), "*Modeling of social Organizations: Necessity and Possibility*", *Emergence*, 4(1/2), 131-146.
45. Ray, Thomas (1991), "*An Approach to the Synthesis of Life*", In C. G. Langton, et al. eds. *Artificial Life II.* Redwood City, CA: Addison-Wesley.
46. Rescher, N. (1998), *Complexity: a philosophical overview*, Transaction Publishers.
47. Rosenberg, Alex (2001), *Reductionism in Historical science*, *Philosophy of Science*, 68 (June) pp. 135-163.
48. Rycroft R. W. and D. E. Kash (1999), *The Complexity Challenge: Technological Innovation for the* 21st *century*, Pinter, London and New York.
49. Scriven, M. (1985), "Definition, Explanations, and Theories". In: H. Feigel, et al eds. *Minnesota Studies In the Philosophy of Science.* Vol. 2. University of Minnesota Press.
50. Selman, Alan L. edit (1990.), *Complexity Theory Retrospective*, New York: Springer-Verlag.
51. Waldrop, M. Mitchell (1992), *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*, New York: Simon & Schuster.
52. Weaver, W. (1948), "*Science and Complexity*", Scientist, 36(4): 536-544.
53. Winsberg, Eric (2003), "*Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World*", *Philosophy of Science*, 70 (January) pp. 105-125.
54. www.santafe.edu
55. Zurek, W. H. (1991), ed, *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, SFI, Vol. 3, Addison-Weskey Publishing Co.

后　记

系统科学及其哲学问题一直是我的兴趣焦点，这主要是由于我的学科背景使然。我大学时代学的是工业自动化，虽然我不喜欢工科，但我对其中蕴涵的系统、信息和控制等系统思想却情有独钟。本来考硕士的时候，就想跟随中国人民大学的苗东升教授研究系统哲学，但由于不可言说的原因，我和苗老师失之交臂，留下了一生的遗憾。后来还是我的母校中南大学收留了我，让我跟随陈文化教授。陈老师以技术哲学见长，我也随之转向了技术哲学的研究。正当我对技术哲学有了初步研究并取得一定的成绩之时，邓小平南巡之后的下海潮让广大知识分子都难于坐在学术的冷板凳上，再加上其他一些原因，我也随着海潮辞去了大学的工作，到广州、深圳等地外资企业工作了。虽然后来回到了内地，但我没有回到大学，没有回到学术研究之路，而是自己开公司，继续在商海之中怡然自得。虽然生意做得不错，但内心总是隐隐作痛，总惦记着科技哲学，总感觉哲学在呼唤着我回到他的身边。于是我边做生意，边留心博士招生的情况。正当这时，清华大学开始了科技哲学博士点的第一次公开招生。我立即与当时并不相识的吴彤教授通了电话。吴老师很热情，希望我能够放下手中的生意去继续我的科技哲学研究。他当时主要在研究自组织理论的哲学问题，这又钩起我对系统科学与哲学的热爱。于是我壮着胆子，报考了他的博士并幸运地被录取。所以，今天我能够继续我所热爱的科技哲学研究，特别最终能以我追随了近20年的系统哲学为归宿点（我认为复杂性哲学是系统哲学的第三个发展阶段），主要要归功于吴彤老师，是他在关键时刻把我从商海中拉上了岸，使我从一个商人又变成了一名学者。吴老师不嫌弃我在商海中沉浮长达近十年之久，而是向我伸出了鼓励和支持之手，在此我要特别感谢吴彤老师对我的赏

识和鼓励。正因如此，在清华大学读博期间，我不敢有丝毫的放松，生怕辜负老师的殷切期望。

经商近十年，虽然放弃了自己钟爱的哲学研究事业，但我也得到了从书本中难于学到的许多东西。作为一个哲学工作者，虽然要从大量的文献中吸取养料，但也很需要加入社会洪流之中，积累一定的社会实践经验和感悟切身感受。如果不是当年的阴差阳错，我也绝对不可能对社会有这样一个身入其中的真情实感，也没有闲暇去阅读自己专业以外的大量书籍，也许会像大多数学者一样，一生都埋首于自己专业的书本之中。所以，下海虽然耽误了一些研究工作，但我不后悔，我只是会更加倍努力，把耽误的研究工作尽量弥补回来。

本书是在我的博士论文的基础上略作修改而成的。衷心感谢导师吴彤教授三年来对我的学习、生活等各方面给予的帮助和支持。特别是在我论文写作期间，吴老师在百忙之中对我的论文选题、结构和写作等方面给予了悉心的指导，他的言传身教将使我终生受益。从导师身上，我学到了作为一个真正学者所需要具备的素质和品质。我还要感谢清华大学科学技术与社会研究中心的曾国屏教授、刘兵教授、曹南燕教授、肖广岭教授、李正风教授、王魏博士、张成岗博士以及研究中心的其他全体老师在我三年读博期间的热心指导与帮助。

在论文评审过程中，北京大学赵光武教授、中国社会科学院金吾伦研究员、闽家胤研究员和清华大学科学技术与社会研究中心曾国屏教授、肖广岭教授以及三位不知名字的匿名专家对论文做了认真的审阅，并一致给出了优秀的评价，同时也提出了许多中肯的建议。在答辩过程中，来自中国社科院的朱葆伟教授、北京师范大学的王德胜教授以及清华大学的曾国屏教授、肖广岭教授和李正风教授也曾提出了许多宝贵的意见和建议。笔者在修改过程中，对专家们的意见和建议尽量汲取，但由于忙于其他工作，这次没有做更大的修改。

在读博士期间，同窗师弟妹王娜、李静静、于金龙、薄海等及本中心的其他同学给予了许多有益的帮助。清华大学哲学系的庞世伟博士、左高山博士经常与我进行热烈的讨论，从中获益良多。我的硕士生导师、中南大学陈文化教授自始至终关心着我的学业和研究工作。中国人民大学的苗东升教授给予了许多的鼓励和帮助，我从他发表的大量论文中汲取了许多观点。南京大学王英博士也给了我许多鼓励和支持。在此我对他们表示衷心的感谢。

江西财经大学党委书记伍世安教授、校长廖进球教授等校领导给了我

诸多的关照,学校其他部门特别是人文学院给我一路绿灯,为我创造了良好的后续研究的学术环境和条件。廖进球教授还接收我为博士后弟子,让我有机会聆听伍世安、廖进球和吴照云等教授的精彩课程,弥补了自己经济学和管理学知识的不足,并使我能够把复杂性的思想和方法应用于经济学特别是产业经济学之中,开展复杂性经济学和产业复杂性研究工作。在此我特别感谢江西财经大学的学校领导以及人文学院的陈家琪教授、谢新力教授和王耀德教授。

本书能够顺利出版,得益于重庆大学出版社的雷少波先生。我们虽然从未谋面,但雷先生给我惠寄了他们已经出版的"万卷方法"丛书,并主动向我约稿。雷先生为繁荣我国社会科学方法研究策划了"万卷方法"丛书,并为之作出了的诸多努力,这种为方法理性鼓与呼的精神尤其显得难能可贵。在此表示由衷的敬意和感谢!

本研究还得到了美国密歇根大学及香港中文大学教育哲学讲座教授杜祖贻等名家发起的"教育及社会科学应用研究论文奖计划"的立项和资助,并在论文奖计划十周年的大会上宣读交流,特此致谢!

最后,我还要感谢我的家人特别是我的父母。父母从小就教育我怎样做一个正直善良的人,正是他们的支持鼓励和辛勤培养,才使我从乡村田野走向了高等学府,走向了艰深的学者之路。如今他们都已经年近八旬,然而我却好像还没有真正报答他们,我感到十分惭愧。我的儿子黄亮一句激励我的话,让我鼓足勇气走进了清华大学,我要特别感谢他。此外,还要感谢妻子为了我安心研究工作而分担了大部分的繁重家务。

对复杂性科学方法论的研究,本书只是一个粗浅的探索与尝试。由于笔者才疏学浅,因而缺点错误在所难免。恳请学界前辈、同仁多多海涵,并不吝赐教。

黄欣荣

2006 年 3 月 30 日